

Article, Published Version

Pulina, Bernd; Voigt, Axel

Lastbeanspruchungen langgestreckter Bauwerke in der Wasserstraße

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102908>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pulina, Bernd; Voigt, Axel (1985): Lastbeanspruchungen langgestreckter Bauwerke in der Wasserstraße. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 57. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 35-74.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dipl.-Ing. Bernd P u l i n a
und
Ing. grad. Axel V o i g t

LASTBEANSPRUCHUNGEN LANGGESTRECKTER BAUWERKE IN DER WASSERSTRASSE

Load strains of elongated buildings
on waterways

Inhaltsangabe

Zu den Einflußfaktoren, die die Größe der einzelnen Lastanteile wesentlich beeinflussen, gehören:

- a) Die Kinematik, Masse und die geometrische Form des Schiffskörpers.
- b) Die Gestaltung des Fahrwassers und des beanspruchten Bauwerks.
- c) Die Abflußverhältnisse.

Es werden zunächst Aussagen über die Druckkräfte, die auf die durchbrochene Trennmole während der Schiffsvorbeifahrt wirken, gemacht. Des weiteren wird auch die Wasserauflast auf die eingetauchte Molenfläche genannt, die beim Wiedereinleiten des Abflußanteils aus dem Vorhafenbereich in das eigentliche Flußbett erzeugt wird. Schließlich wird auch der Einfluß der umgebenden Wassermasse auf die Kraftreaktion bei einer starken ungleichförmigen Bewegung des Schiffskörpers (streifender Schiffstoß) behandelt. Die Wasserreaktion wird dabei durch den Ausdruck der hydrodynamischen Masse erfaßt. Die hydrodynamische Masse ist aber nicht die Masse eines erfaßbaren begrenzten Flüssigkeitsvolumens, sondern vielmehr eine formale Abstraktion, die den Vorteil der Anschaulichkeit besitzt.

Summary

To the factors which have influence over the magnitude of the particular loadshare belong:

- a) The kinematic mass and the geometrical form of the ship's hull.
- b) The formation of the navigation channel and of the berthing structure.
- c) The condition of discharge.

Evidence is given about the compressive forces coming into effect during the ship's sailing past the perforated separation mole. Furthermore, the force of the stream discharge on the immersed mole surface is named, which is caused by the renewed flowing of part of the discharge out of the dock harbour into the river bed. Likewise the effect of the surrounding water mass on the force reaction with a rapidly varied motion of the ship's hull sliding impact. The reaction of the water particles surrounding the ship's hull is the so-called "hydrodynamic" or "added" mass. The "hydrodynamic" mass is not the mass of a defined volume of fluid, but rather a formal abstraction which has the advantage of clearness.

I N H A L T

	Seite
1 Vorbemerkung	37
2 Meßeinrichtungen und Verfahren der Messung	39
3 Bezugssystem und Meßkonzept	40
4 Untersuchungsergebnisse	45
4.1 Dynamische Verkehrslast während der Schiffsvorbeifahrt	45
4.2 Hydrodynamische Rückströmungskraft	48
4.3 Schiffsstoß bei streifender Anfahrt	50
4.3.1 Eichung der Meßvorrichtung	52
4.3.2 Maxima der Kräfte und Beschleunigungen in der betrachteten Bewegungsrichtung	56
4.3.3 Einfluß der Aufprallwinkelgröße	58
4.3.4 Der Stoßvorgang mit und ohne Wasserumgebung	60
4.3.5 Ersatzmasse (virtuelle Masse) für ein wasserumgebenes Schiff	62
4.3.6 Ersatzmassenmoment 2. Grades für das wasserumgebene Schiff	67
5 Zusammenfassung	70
6 Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen	71
7 Literatur	73

1 Vorbemerkung

An Wasserstraßen können auf langgestreckte Bauwerke Lastbeanspruchungen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit ihres Zusammenstreffens wirken. Unter langgestreckten Bauwerken sind durchströmte Leit- und Trennbauwerke zu verstehen.

Im betrachteten Fall geht es um einen 30 m breiten und 3,4 m tiefen Vorhafen. Zwischen Vorhafen und Wehrbucht wird eine durchbrochene Trennmole (Bild 1) angeordnet.

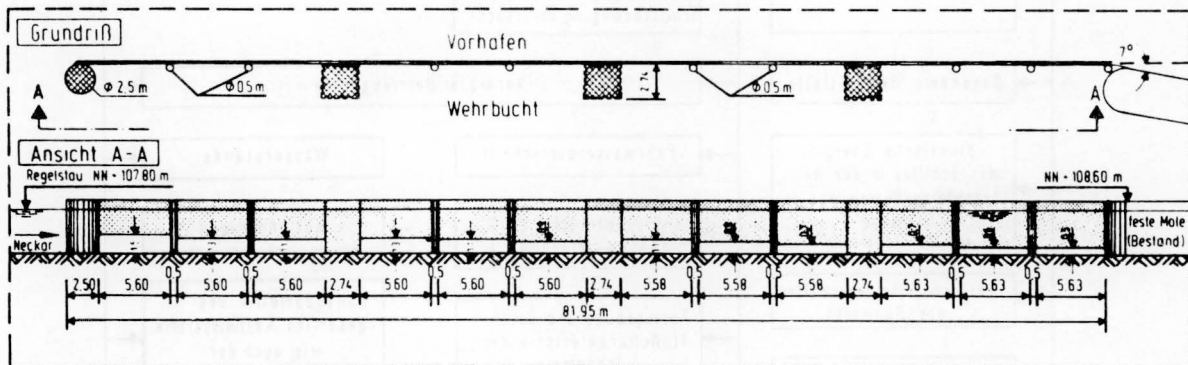


Bild 1 Gestaltungsform und Abmessung der durchbrochenen Trennmole

Im Vorhafen können Schubverbände mit einem Schubleichter Europa II verkehren. Die Großausführung mit einem Verdrängungsvolumen von rd. 2.500 m³ wurde, im Modellmaßstab 1:50 verkleinert, der Untersuchung zugrunde gelegt.

Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf Vorgänge, die entweder durch die Veränderung der Randgeometrie oder durch die ungleichförmige Bewegung der fahrenden Schiffe in dem umgebenden Wasser hervorgerufen werden.

Die hier behandelten Fragen sind einerseits für die Bemessung der Trennmole, andererseits auch für die Schifffahrt bei Anfahr- und Stoppvorgängen, sowie den Vorgängen beim Navigieren bedeutsam. Je nach der Häufigkeit der auftretenden Belastungen und je nach der Wahrscheinlichkeit ihres Zusammentreffens kann zwischen normalen und besonderen Betriebsfällen unterschieden werden.

Als normale Betriebsfälle sollen hier die Belastungen gelten, die in Form von hydrodynamischen Widerstandskräften und von Beschleunigungsdrücken aus der Schifffahrt auf die eingetauchte Molenfläche wirken. Die infolge von Schiffsstoß und Schiffsreibung seltener vorkommenden Belastungen sind als besondere Betriebsfälle einzustufen. Diese Belastungen müssen zusätzlich berücksichtigt werden, weil ihr Zusammentreffen mit den normalen Betriebsfällen möglich und wahrscheinlich ist.

Aus dem vorstehenden wird deutlich, daß unter der Wirkung des freifahrenden Schiffes Kräfte auf die eingetauchte Molenfläche übertragen werden, die hier als Verkehrslast benannt wurden (Bild 2).

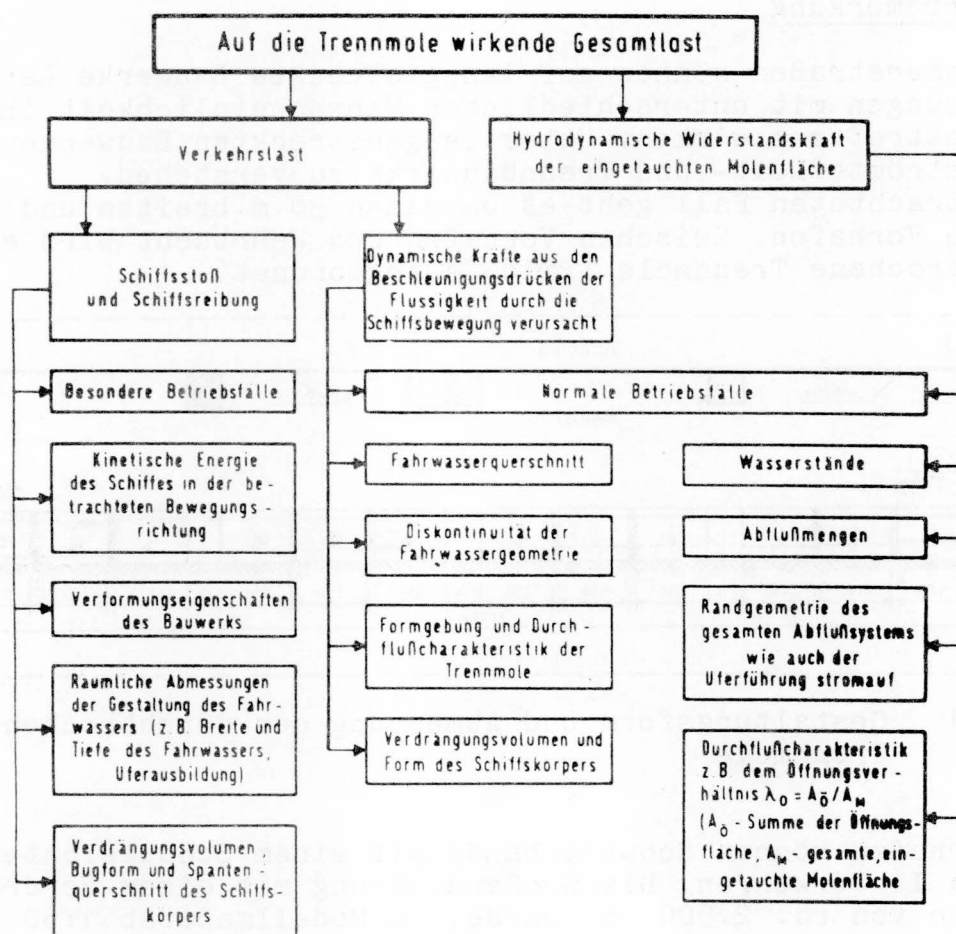


Bild 2 Blockdiagramm der Lastfälle.
Ursprungsmechanismus und Einflußfaktoren

Die Verkehrslasten sind primär vom Verdrängungsvolumen des Schiffskörpers, dessen Bugform und Spantenquerschnitt abhängig. Die Fahrwassereigenschaften dürfen dabei jedoch nicht vernachlässigt werden.

Bei den simulierten Naturvorgängen im Modell sind komplexe Wirkungssysteme beteiligt, die nicht immer modellgerecht abbildbar sind. Das Modellgesetz von Froude ist für Vorgänge gültig, in denen die Schwerkraft und Trägheitsreaktionen dominieren. Die Zähigkeits- und Elastizitätskräfte werden dabei vernachlässigt. Bild 2 zeigt, daß in den besonderen Betriebsfällen die nicht modellierbaren Verformungseigenschaften des Bauwerks zu berücksichtigen sind. Daraus ergibt sich, daß für den Geltungsbereich der besonderen Betriebsfälle im Modell nur die vorhandenen Unterschiede zwischen den Kräften bei einer luftumgebenen und wasserumgebenen Schiffsmasse bestimmt werden können. Alle Kräfte, die in den normalen Betriebsfällen (s. Bild 2) wirksam sind, können mit den Froude-Maßstabsbeziehungen aus dem Modell in die Natur übertragen werden.

n
nen
e
edU
00r

eben
esul-
die
nung

Für
en-

Anmerkung 1: Alle Teile der Meßvorrichtung zur Aufnahme der Stoßkräfte (Bild 3) liegen über der Wasserspiegellinie. Durch diese Anordnung wurde eine gleichbleibende Mitwirkung der gestoßenen Masse sowohl beim luftumgebenen als auch beim wasserumgebenen Schiffskörper erreicht.

Über der durchbrochenen Trennmole war ein I-Breitflanschträger 100 als starre Auflagerkonstruktion eingebaut. Eine dazugehörige Halterung gestattete an dieser Auflagerkonstruktion zwei Messingbiegestäbe einseitig einzuspannen. Die nicht eingespannten Stabenden wurden dann durch einen horizontalen Stoßbalken verbunden (Bild 3).

Die Stoßkraft wird über Dehnungsmeßstreifen (DMS-Aufnehmer) an den Biegestäben erfaßt. Auf dem freifahrenden ferngesteuerten Modellschiff wurden an den in Bild 3 skizzierten Stellen Beschleunigungsaufnehmer angeordnet.

Bei der Durchführung der Messung sind Beschleunigungsaufnehmer, diverse Dehnungsmeßstreifen, Trägerfrequenzbrücken, x-y-Schreiber, UV-Schreiber und ein Speicher-Oszilloskop zum Einsatz gekommen.

Bei der Beurteilung der Messung war zu beachten, daß zunächst Erfahrungen gesammelt werden mußten. Bei stoßartigen Beanspruchungen waren Signale zu verarbeiten, die für den Bereich der Mechanik schon als hochfrequent zu bezeichnen sind. Bei den Beschleunigungsaufnehmern und auch bei der Registrierung mittels UV-Schreiber war daher die obere Grenzfrequenz zu beachten.

3 Bezugssystem und Meßkonzept

Unter Hinweis auf die Ausführungen des vorstehenden Abschnitts 2 erscheinen weitere Erläuterungen bezüglich des Meßkonzeptes der Kräfte, die den normalen Betriebsfällen zuzuordnen sind, entbehrlich. Über die Versuchsreihen, die zwecks Erfassung der Vorgänge während eines besonderen Betriebsfalles auszuführen waren, sollen demgegenüber schon an dieser Stelle einige konkretisierende Angaben gemacht werden.

Angestrebtes Versuchsziel war hierbei die Abschätzung der komplexen Gesamtreaktion des Wassers, die bei der Übertragung der kinetischen Energie auf ein Bauwerkssystem während eines streifenden Schiffsstoßes zum Vorschein kommt. Um die Stoßbewegung unter den Umgebungsbedingungen der Natur im Labor zu simulieren, ist folgendes Meßkonzept angewandt worden:

- a) Vor der Trennmole wurde ein Stoßbalken an zwei Biegestäben angeordnet (s. Bild 3). Auf jedem Biegestab wurden zwei Dehnungsmeßstreifen angebracht, die zueinander unter einem rechten Winkel lagen. ($\pi \cdot d/4$ auf der Peripherie) Dadurch war es möglich, die Kraftkomponenten in N-T-Richtung während des Stoßvorganges aufzuzeichnen.

- b) Auf dem Schiff wurden drei Akzelerometer (Beschleunigungsaufnehmer) eingebaut (s. Bild 3). Davon zwei rechtwinklig zueinander liegend in der Schiffsmitte und einer senkrecht zur Längsachse des Schiffes an der Stoßstelle im Bug. Diese Anordnung der Akzelerometer ermöglicht eine exakte Aufzeichnung der Beschleunigungsgrößen des Stoßspektrums in x-y-Richtung um die Bewegung des Stoßerregers (der stoßenden Kraft) zu erfassen.

Die mit Kraft- und Beschleunigungsgrößen beschriebenen Schiffsstöße wurden zeitabhängig aufgezeichnet und in ein gemeinsames Koordinatensystem eingerechnet. Bild 4 ist die Transformation des Koordinatensystems x-y in das Koordinatensystem N-T zu entnehmen.

Für die luftumgebene Schiffsmasse sind dabei folgende Gleichgewichtsbedingungen gültig:

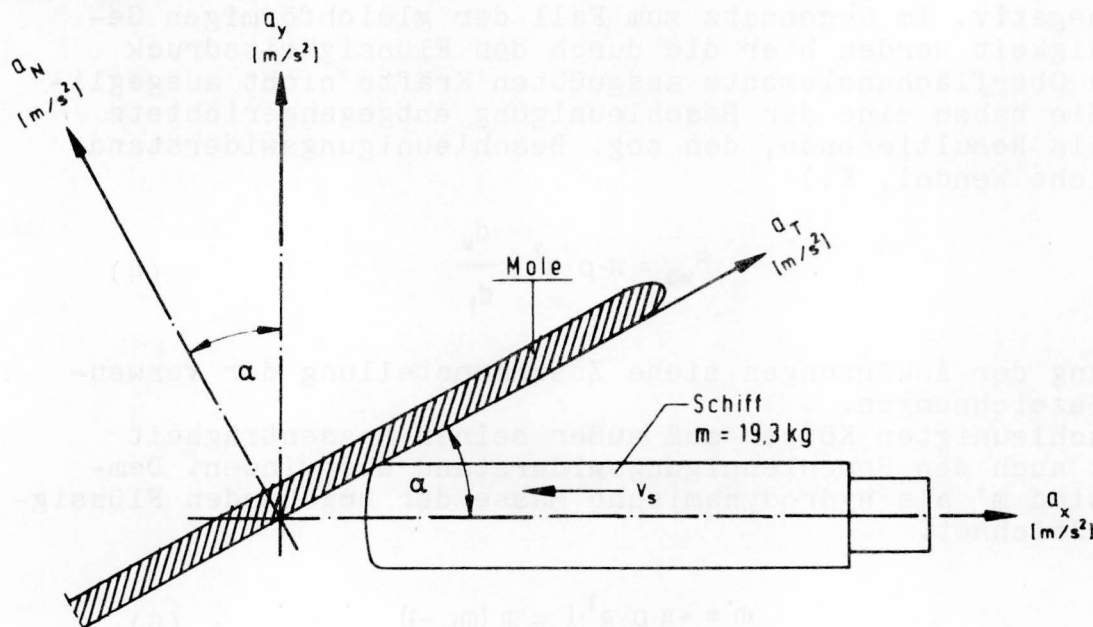
$$\Sigma N: m \cdot a_N = F_N \quad (1)$$

$$\Sigma T: m \cdot a_T = F_T \quad (2)$$

$$\Sigma M: \theta \cdot \varphi = F \cdot s_x \quad (3)$$

(siehe Bild 3).

Die Symbole in den Gleichungen 1 - 3 haben die Bedeutung, die in der Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen angegeben wird.



$$a_N = a_y \cdot \cos \alpha - a_x \cdot \sin \alpha \quad a_T = a_x \cdot \cos \alpha + a_y \cdot \sin \alpha$$

Bild 4 Gewähltes Bezugssystem

Wenn ein geometrischer Körper in der ihn umgebenden Flüssigkeit ungleichförmig bewegt wird, so müssen bei der Erfassung aller auftretenden Kräfte auch die Drücke berücksichtigt werden, die aus der zeitlich veränderlichen Verteilung der Geschwindigkeitsfelder $\rho/2 \cdot u^2$ herrühren.

Hinzu treten die von der Beschleunigung stammenden Drücke, deren Verteilung aus Bild 5 zu ersehen ist.

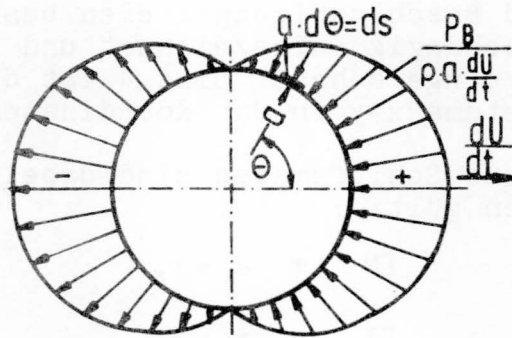


Bild 5 Beschleunigungsdruck-Verteilung auf der Zylinderoberfläche (nach Wendel, K., Jahrbuch der Schiffsbau technischen Gesellschaft Band 44/1950, S.210)

Auf der in Beschleunigungsrichtung liegenden Seite (Bild 5) ist der Überdruck positiv. Auf der Rückseite ist der Überdruck negativ. Im Gegensatz zum Fall der gleichförmigen Geschwindigkeit werden hier die durch den Flüssigkeitsdruck auf die Oberflächenelemente ausgeübten Kräfte nicht ausgeglichen. Sie haben eine der Beschleunigung entgegengerichtete Kraft als Resultierende, den sog. Beschleunigungswiderstand F_{WB} (siehe Wendel, K.)

$$F_{WB} = \pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot l \cdot \frac{du}{dt} \quad (4)$$

Bedeutung der Abkürzungen siehe Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen.

Ein beschleunigter Körper muß außer seiner Massenträgheit $m \cdot du/dt$ auch den Beschleunigungswiderstand überwinden. Demgemäß wird m' als hydrodynamische Masse der umgebenden Flüssigkeit bezeichnet.

$$m' = +\pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot l = m (m_w - 1) \quad (5)$$

Die hydrodynamische Masse ist nicht die Masse eines tatsächlich erfaßten begrenzten Flüssigkeitsvolumens, sondern eine formale Abstraktion, die den Vorteil der Anschaulichkeit besitzt.

Die Gesamtkraft, die zur Beschleunigung eines flüssigkeitsumgebenen Körpers aufzubringen ist, beträgt demnach F_G

$$F_G = (m + m') d_u / d_t \quad (6)$$

Die hydrodynamische Masse ist von der Masse des Körpers unabhängig. Für die wasserumgebene Schiffsmasse sind die Gl. (1) bis (3) um den jeweiligen Kraftanteil des Beschleunigungswiderstandes F_{WN} , F_{WT} und $F_{WN} \cdot x$ zu erweitern.

$$m \cdot a_N + (F_{WB} + F_{WU})_N = F_N = m_N \cdot a_N \quad (7)$$

$$m \cdot a_T + (F_{WB} + F_{WU})_T = F_T = m_T \cdot a_T \quad (8)$$

$$\theta \cdot \dot{\varphi} + (F_{WB} + F_{WU}) \cdot X = F \cdot S_X = \theta_M \cdot \dot{\varphi} \quad (9)$$

wobei m_N ; m_T ; θ_M auch in der Form

$$m_N = m_{WT} \cdot m \quad (10)$$

$$m_T = m_{WN} \cdot m \quad (11)$$

$$\theta_M = \theta_W \cdot \theta \quad (12)$$

der Gl. (10) bis (12) definiert werden können.

Als Äquivalent für die existente Wasserreaktion (Druckwiderstand der ungleichförmigen Bewegung) wurden Ausgleichsmultiplikatoren für jede betrachtete Bewegungsrichtung eingeführt, die auf die Schiffsmasse bezogen sind. Damit sind dann die sog. fiktiven Massen so bestimmbar, daß die Gesamtkraft für die Beschleunigung und die kinetische Energie des wasserumgebenen Schiffes in der betrachteten Bewegungsrichtung den tatsächlich meßbaren Werten entspricht.

Praktisch mußte zunächst in einem ersten Schritt die mechanische Eigenschaft des Systems im Fall der luftumgebenen Schiffsmasse quantitativ erfaßt werden (siehe nachstehender Abschnitt 4.3.2). In einem zweiten Schritt konnte dann die gesamte Wasserreaktion "rückwärts" berechnet werden.

Dieses Vorgehen ermöglichte,

- * die Bestimmung einer Vergrößerungsfunktion der ungleichförmigen Bewegung m_w
 $(m_w = (1 + \Phi_L) \lambda / (\lambda + \Phi_L))$ siehe Gleichung (32)), mittels der die hydrodynamische Masse $m' = m(m_w - 1)$ berechnet werden kann. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die Vergrößerungsfunktion m_w von den mechanischen Eigenschaften des Systems abhängig ist (s. Gl. (25)). Die in Bild 20 dargestellte Vergrößerungsfunktion m_w kann daher nur für die mechanischen Eigenschaften (F(s)-Verformung, F(R)-Reibung) des Systems zutreffend sein, die im Modell simuliert wurden,

- * daß nicht modellgerecht abbildbare Parameter, die den Stoßablauf mitprägen, bei der Bestimmung der Gesamtreaktion des Wassers einflußlos sind,
- * die Geometrieparameter des Fahrwassers und des Schiffes so vorzugeben, daß die Reaktion des umgebenden Wassers der realen Situation entspricht.

Ein einfacher Stoß kann als Übertragung von kinetischer Energie auf ein System betrachtet werden, die während einer im Verhältnis zur Eigenperiode des Systems relativ kurzen Zeit vollzogen wird.

Die Erregerfunktion $F = m \cdot a(t)$ ist beim Schiffsstoß auch unter Laborbedingungen schwierig zu messen. Die weiteren Ergebnisse basieren daher auf folgenden grundlegenden Annahmen:

1. Die wasser- und luftumgebene Schiffsmasse (stoßende Masse) bleibt konstant und beträgt in unserem Fall $m = 19,3 \text{ kg}$.
2. Das Verhalten des Meßsystems (Antwort des Systems) ist bei der luftumgebenen und wasserumgebenen Schiffsmasse gleichbleibend (s. hierzu auch Anmerkung zu Bild 3).
3. Als Referenzbasis werden die Meßergebnisse angenommen, die mit der luftumgebenen Schiffsmasse erfaßt wurden (s. Abschnitt 4.3.2).

Die Stoßenergie bei einer Schiffskollision wird in verschiedene Energiearten aufgeteilt und ein Teil durch Formänderungs- und Oberflächenreibungsarbeit zwischen den festen Körpern in Wärme umgewandelt.

Um die vom Verhalten des Systems (Bauwerk-Schiff) abhängigen Verlustanteile zu erfassen, mußten die negativen Beschleunigungen der stoßenden Masse gemessen werden. Daraus ist die Erregerkraft $m \cdot a(t) = F$ der betrachteten Wirkungsrichtung berechenbar. Das Verhalten des vorliegenden Meßsystems kann durch die nachstehende Gl. (13) beschrieben werden.

$$m \cdot a(t) = F(t) + F(s) + F(R) \quad (13)$$

Nach Umformung

$$m \cdot a(t) = F(t) \cdot \left[1 + \frac{F(s) + F(R)}{F(t)} \right] \quad (14)$$

wenn

$$1 + \frac{F(s) + F(R)}{F(t)} = \xi \quad \text{dann} \quad m \cdot a(t) = \xi \cdot F(t) \quad (15)$$

Mit den Gleichungen (14) und (15) wird die zeitabhängige Systemreaktion auf eine auftretende dynamische Lastbeanspruchung beschrieben.

4 Untersuchungsergebnisse

Im weiteren Verlauf der Ausführungen wird von den bereits besprochenen Überlegungen Gebrauch gemacht. Als Vorbemerkung sei hervorgehoben, daß die Ergebnisse der Abschnitte 4.1 und 4.3 im begrenzten Fahrwasser mit dem auf Bild 3 dargestellten Schubverband gewonnen wurden. Die Gültigkeit aller Aussagen bleibt auf die vorstehend umrissenen Randbedingungen beschränkt. Des weiteren sei bemerkt, daß beim Schiffsstoß die Beschleunigung negative Vorzeichen annimmt. Die Wirkungsrichtung der unter Abschnitt 3 definierten resultierenden Kraft des Beschleunigungswiderstandes wird dadurch um 180° geändert.

4.1 Dynamische Verkehrslast während der Schiffsvorbeifahrt

Ein kurzer Abriß über das dynamische Wirkungssystem, welches die in der Überschrift genannte Verkehrslast hervorruft, ist wegen der praktisch geforderten Erfassungsgenauigkeit notwendig.

Gleichzeitig soll dadurch auch die getroffene Wahl der Meßanordnung, die im vorstehenden Abschnitt 2 beschrieben ist, plausibel werden.

Die Drücke an einer ortsfesten Stelle der Trennmole, die vom vorbeifahrenden Schiff hervorgerufen werden, bestehen aus zwei Anteilen:

- a) den Druckänderungen aus der Verdrängungsströmung um das Schiff,
- b) den Druckänderungen infolge der Wellenbildung.

Die Vorgänge können mit der Gl. (16) veranschaulicht werden.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_v = C(t) - \frac{1}{g} \int_{s_1}^{s_2} \frac{\delta v}{\delta t} \cdot ds \quad (16)$$

(Bedeutung der Abkürzungen siehe Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen).

Die Realität ist komplizierter als das, was ein vereinfachendes Gleichungssystem erfassen und ergeben kann. Im vorliegenden Fall ist eine Zuordnungsvorschrift der zeitabhängigen Funktion $C(t)$ nicht definierbar. Dies liegt daran, daß das Schiff und die umgebende Wassermenge als eine vom Fahrkurs abhängige dynamische Einheit anzusehen sind. Quantitative Kriterien für das Strömungsfeld können daher selbst dann nicht gefunden werden, wenn die strömungsbegrenzenden Umrisse und die Geometrie des Schiffes bekannt sind. Des weiteren sei erwähnt, daß der Eigenart der Heckwelle dabei besondere Bedeutung zukommt. Diese Eigenart liegt darin, daß in Trennmolennähe aus der Welle eine mitlaufende Strömung entsteht, die in Form einer konischen Wasserwalze auftritt. An der Trennmole unterliegt die beeinflusste Wassermenge also nicht mehr den wellenmechanischen Gesetzmäßigkeiten und kann nicht als "Welle" bezeichnet werden. Das mit dem Schiff wandernde Druckfeld wird darüberhinaus durch instationäre Einflüsse verändert.

Solche grundsätzlichen Beeinflussungen entstehen durch

1. plötzliche Erhöhung der Antriebsleistung,
2. Verminderung des Kanalquerschnitts,
3. Übergang vom Stillwasser in die Strömung.

Es wird daraus offensichtlich, daß die verwickelten Vorgänge für eine ausreichend präzise Bestimmung der Druckkraft sehr dicht nebeneinander liegende Druckaufnehmer erforderlich machen würden. Durch die hier gewählte Meßanordnung wird der Einsatz örtlicher Druckaufnehmer kompensiert. Mit der gewählten Meßanordnung können die resultierenden Druckkräfte, die auf die Trennmole infolge des vorbeifahrenden Schiffes entstehen, mit allen sonst nicht erfaßbaren Nebeneinflüssen registriert werden.

Im vorliegenden Fall waren die quantitativen Parameter wie Schiffstiefgang zur Wassertiefe und Schiffsbreite zur Wasserspiegelbreite, die entscheidend die hydrodynamischen Vorgänge beeinflussen, unveränderlich vorgegeben. Die Schiffsgeschwindigkeit über Grund sowie der Abstand des fahrenden Schiffes zur Trennmole sind in strömungstechnischer Hinsicht den variablen Größen zuzuordnen. Die Versuche waren in der Hauptsache auf die Untersuchung des Einflusses der variablen Parameter auf die Druckkraft konzentriert. Auf Bild 6 sind die Komponenten und Resultierenden der fahrtbedingten Druckkräfte in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit dargestellt.

Der Geltungsbereich der Ergebnisse wird durch die Skizzen von Bild 6 umrissen.

Die Versuchsergebnisse von Bild 6 zeigen folgendes:

- a) Mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit steigt die Druckkraft deutlich an. Der Kraftanstieg hat in beiden Molenteilstücken annähernd den gleichen Wert.

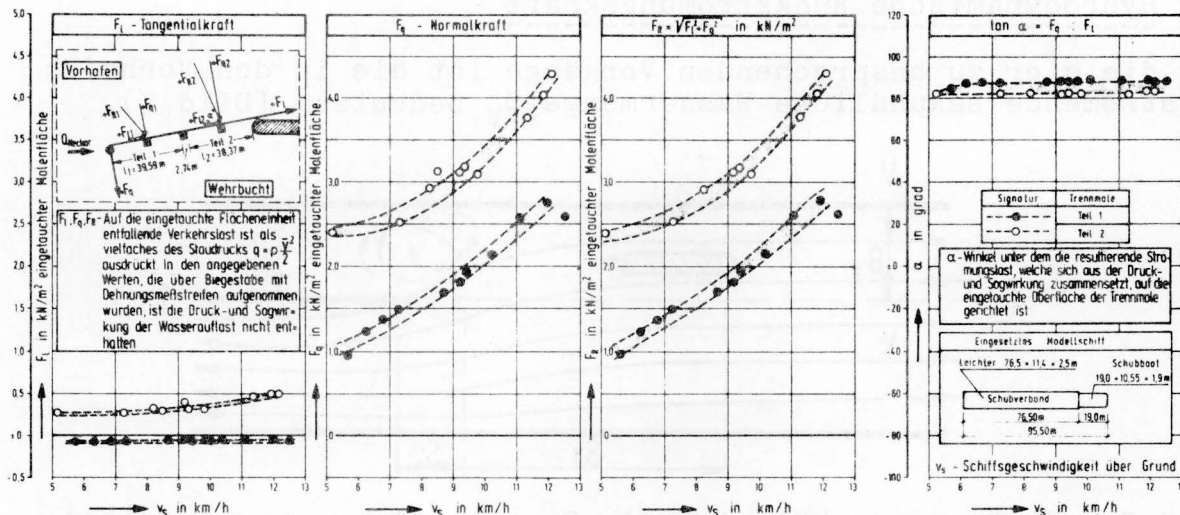


Bild 6 Dynamische Verkehrslast während der Schiffs vorbeifahrt (Fahrwassertiefe/Tiefgang = konstant, Wasserbreite/Schiffsbreite = konstant, Schiffsmasse = $2500 \cdot 10^3$ kg (Natur), $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s} = \text{HSQ}$)

- b) Die Druckkraft wird zur festen Mole hin größer. Man kann sich diese Erscheinung so erklären, daß die zur Mole hin vorhandenen Öffnungen kleiner werden. Relativ zu den größeren Öffnungen des ortsfesten Systems kann dadurch nur ein kleinerer Anteil der von dem Schiff verdrängten Wassermenge in die Wehrbucht ausweichen. Ein größerer Anteil des beschleunigten Wassers muß in Form eines instationären Vorganges von der Trennmole in den Vorhafen zurückströmen. Die sich gleichzeitig dabei vollziehenden Geschwindigkeitsänderungen finden in der gemessenen Druckkraftgröße ihren Ausdruck.
- c) Die Einzelwerte der gemessenen Druckkräfte bilden in der Darstellung eine Punktwolke, aus der man eine Grundvorstellung über die Streuungsgröße erhält, welche auf den Fahrkurs des Schiffes zurückzuführen ist. Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich, daß mit kleiner werdendem Abstand zwischen dem Schiff und der Mole die Druckkräfte leicht zunehmen. Bei einer gewählten konstanten Geschwindigkeit des Schiffes ergeben sich daraus unterschiedliche Druckkraftgrößen, die innerhalb einer Bandbreite liegen.

Für die Dimensionierung des Leitwerks wären dem Bild 6 die Werte F_L und F_Q zu entnehmen, die den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten des betrachteten Fahrwasserabschnitts entsprechen. Vollständigkeitshalber sei noch erwähnt, daß es sich bei den Druckkräften von Bild 6 um die Maximalwerte handelt, die bei unterschiedlichen Fahrten infolge des mit dem Modellschiff wandernden Druckfeldes auf das Leitwerk wirken.

4.2 Hydrodynamische Rückströmungskraft

Für die hier zu besprechenden Vorgänge ist die in den Vorhafen einströmende sekundliche Wassermenge Q_v bedeutsam (Bild 7).

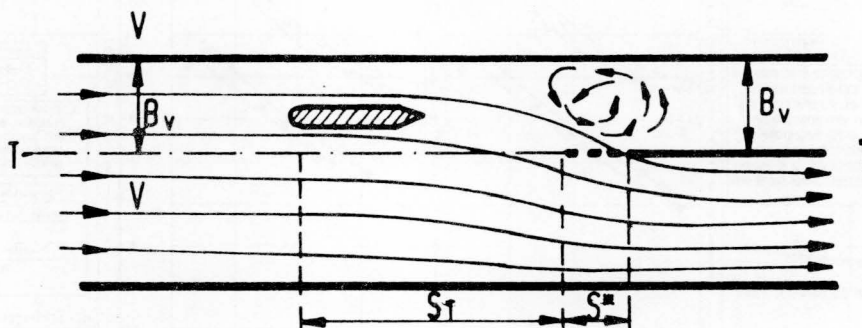


Bild 7 Strömungsverhältnisse im Bereich einer oberstromigen Vorhafenzufahrt (s. Dietz 1978)

Hierin sind

B_v - Vorhafenbreite

h - Wassertiefe

v_m - mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt $B_v \cdot h$

s^* - Durchströmungsbreite der durchbrochenen Trennmole

$$Q_v = B_v \cdot h \cdot v_m \quad (17)$$

Die in den Vorhafen einströmende Wassermenge Q_v muß auf der Länge des durchbrochenen Trennmolenteils in die Wehrbucht zurückfließen.

Bei stationären Abflußbedingungen läßt sich die auf die eingetauchte Molenfläche wirkende Kraft mit der Widerstandsformel für umströmte Körper (18) und der Gleichung für Strömungen mit gekrümmten Bahnen (19) beschreiben:

$$F_w = \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot v^2 \cdot A \quad (18)$$

$$v = \frac{v_m \cdot r_m}{r} \quad (19)$$

Symbole: siehe Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen.

Bei den Modellversuchen wurde die Hauptaufgabe darin gesehen, die Widerstandskraft bei den vorliegenden Randbedingungen zu ermitteln. Die auf die eingetauchte Trennmole wirkenden Kräfte sind von der Wasserführung und der umströmten Trennmolenform abhängig.

Bei der hier festliegenden Trennmolenform (Bild 1) waren im Endergebnis nur noch die Änderungen der Kräfte zu bestimmen, die infolge der Wasserführung zum Vorschein kommen. Bei der Übertragung der Meßergebnisse in die Natur können Zähigkeits- einflüsse nicht ausgeschlossen werden. Der Widerstandsbeiwert $c_w = f(Re)$ kann daher in der Natur teilweise innerhalb des Bereiches der Reynold'schen Zahl liegen, in dem ein Umschlag von der voll laminaren in die turbulente Grenzschicht möglich ist. Dennoch ist die Modelluntersuchung zum Studium der Tauchwandbelastung aufschlußreich, weil über die Untersuchungsart der Einfluß der Wasserführung auf die Strömungskräfte gefunden werden kann. Dem Bild 8 sind alle damit verknüpften Zusammenhänge zu entnehmen.

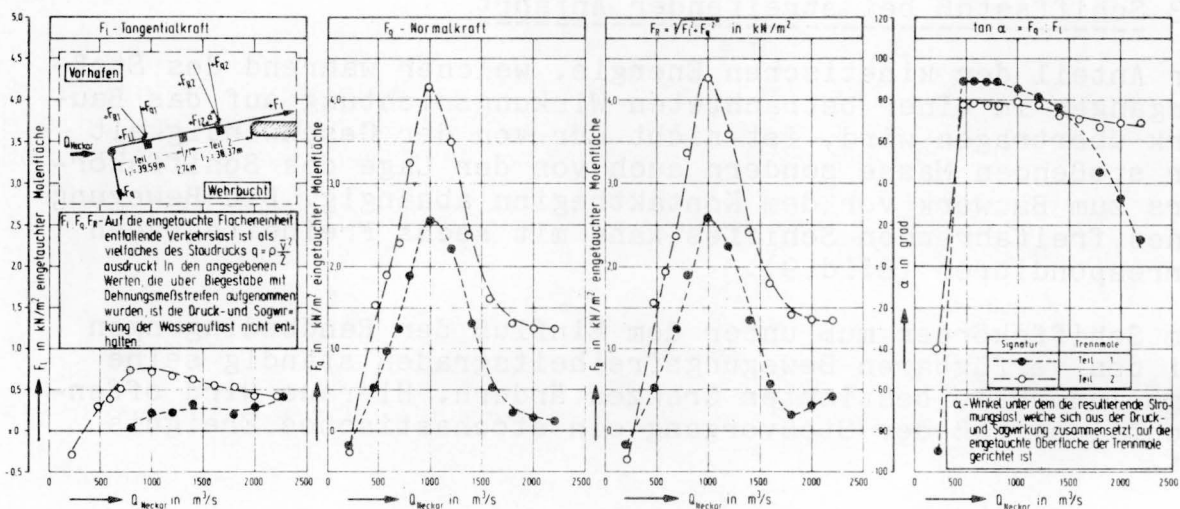


Bild 8 Auf die eingetauchte Molenfläche infolge der Rückströmung wirkende Wasserauflast in kN/m^2

Die Werte von Bild 8 sind Naturmaße. In der Realität können die Naturgrößen die Werte der Abb. 8 unterschreiten, was auf die bereits genannte Unsicherheit der Übertragung zurückzuführen ist. Aus den so erfaßten Meßwerten können die Grenzbeanspruchungen der Rückströmungskraft entnommen werden. Die feststellbaren Erkenntnisse lassen sich wie folgt formulieren (Bild 8):

- Die Tangential- und Normalkräfte, die infolge der stationären Rückströmungsvorgänge auf die eingetauchte Trennmolenfläche wirken, steigen zunächst im Einklang mit größer werdendem Abfluß, um im vorliegenden Fall bei der Wasserführung von etwa $1000 m^3/s$ das absolute Maximum zu erreichen.
- Das absolute Maximum ist von der ortsfesten Lage des betrachteten Molenabschnitts abhängig. Im ersten vom Oberwasser gemessenen Teilabschnitt der Trennmole kann das Maximum der Normalkraft rd. $2,0 kN/m^2$ erreichen. Im zweiten, an die kompakte Trennmole angrenzenden Teilabschnitt gilt ein Maximum der Normalkraft von rd. $4,1 kN/m^2$.

- c) Bei Wasserführungen $Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ wird mit Abflußanstieg eine Ermäßigung der auf die eingetauchte Molenfläche wirkenden Staudruckkraft bewirkt.

Für die statische Dimensionierung der durchbrochenen Trennmole ist im Endergebnis die Kraft relevant, die dem Abfluß von $500 \text{ m}^3/\text{s}$ zugeordnet werden muß. Dies ergibt sich daraus, daß $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in unmittelbarer Nähe zum HSQ liegt. Aus Bild 2 wird des weiteren deutlich, daß die in Ansatz zu bringende Gesamtlast sich aus der dynamischen Verkehrslast für die gewählte Schiffsgeschwindigkeit über Grund (Bild 6) und der hydrodynamischen Widerstandskraft der Rückströmung (Bild 8) zusammensetzt.

4.3 Schiffsstoß bei streifender Anfahrt

Der Anteil der kinetischen Energie, welcher während des Stoßvorganges in einer betrachteten Wirkungsrichtung auf das Bauwerk übertragen wird, ist nicht nur von der Geschwindigkeit der stoßenden Masse sondern auch von der Lage des Schiffskörpers zum Bauwerk vor dem Kontaktbeginn abhängig. Die Bewegung eines freifahrenden Schiffes kann mit sechs Freiheitsgraden korrespondieren (Bild 9).

Der Schiffskörper muß unter dem Einfluß der Randbedingungen bei den verfügbaren Bewegungsfreiheitsgraden ständig seine Lage innerhalb bestimmter Grenzen ändern. Hieraus wird offensichtlich, daß der Stoßvorgang ein stochastisches Ereignis ist.

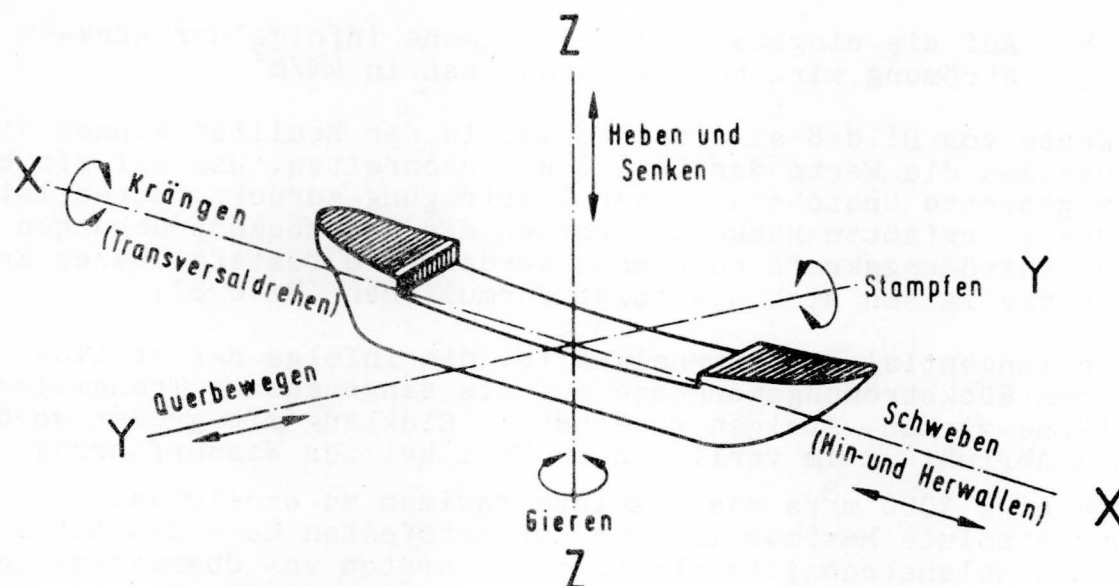


Bild 9 Freiheitsgrade der Schiffsbewegung
(s. Vasco Costa, 1964)

Die Kräfte und negativen Beschleunigungen in der betrachteten Wirkungsrichtung werden also unter den gleichen Randbedingungen unterschiedliche Werte annehmen, jedoch bei einer großen Wiederholungszahl eine bestimmte Stabilität ihres Auftretens zeigen. Den prinzipiellen Kraft- und Beschleunigungsverlauf des streifenden Schiffsstoßes zeigt Bild 10.

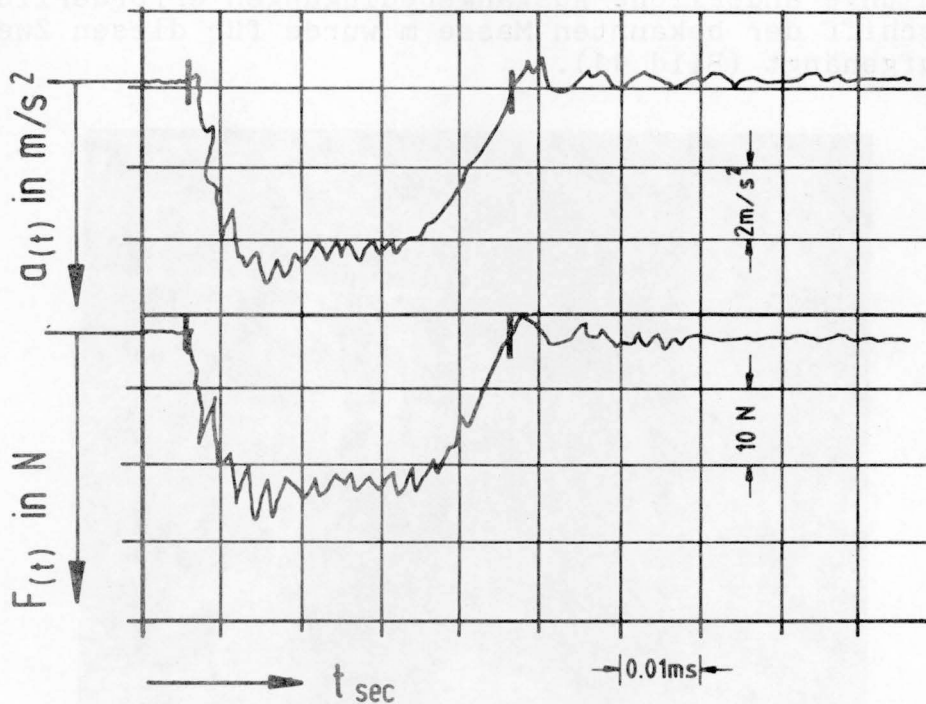


Bild 10 Zeitlicher Stoßkraftverlauf (Aufzeichnung am Speicher-Oszilloskop)

Nach dem ersten Kontakt wird ein Gleichgewichtszustand zwischen Stoßkraft und aktivierten Trägheitskräften eintreten. In dieser ersten Phase entstehen Verformungen und die Kontaktkraft wird bis zum Maximum anwachsen. In einer darauf folgenden zweiten Phase beginnen sich die Bewegungsrichtungen und Komponenten der Geschwindigkeit der stoßenden Masse, d.h. des Schiffskörpers, bei nahezu konstanten Kontaktkräften und Scheitelbeschleunigungen zu verändern (Tauchung, Trimmung, Krängung, Drehung). Der Zeitabschnitt dieser Phase kann 0,001 - 0,01 sec. dauern. Erst in der dritten Phase wird eine Trennung zwischen den stoßenden und gestoßenen Massen eingeleitet, wobei die Kontaktkräfte und Scheitelbeschleunigungen dabei sinken. In der weiteren Auswertung der Versuche wurden die Meßwerte verwendet, die der hier bezeichneten 2. Phase zugehörig sind. Der erste und dritte Zeitabschnitt ist bei der vorliegenden Zielsetzung von untergeordnetem Interesse, da es in diesen Phasen zu keiner kritischen Beanspruchung kommt.

4.3.1 Eichung der Meßvorrichtung

In diesem praktischen Fall mußten zunächst die Eigenschaften des Meßsystems erfaßt werden.

Anmerkung 2: In der Praxis besitzen alle Massen eine gewisse Elastizität und alle Federelemente weisen Massen auf, die Einfluß auf das Stoßspektrum haben.

Dafür waren unveränderliche Ausgangsbedingungen erforderlich. Das Modellschiff der bekannten Masse m wurde für diesen Zweck pendelnd aufgehängt (Bild 11).

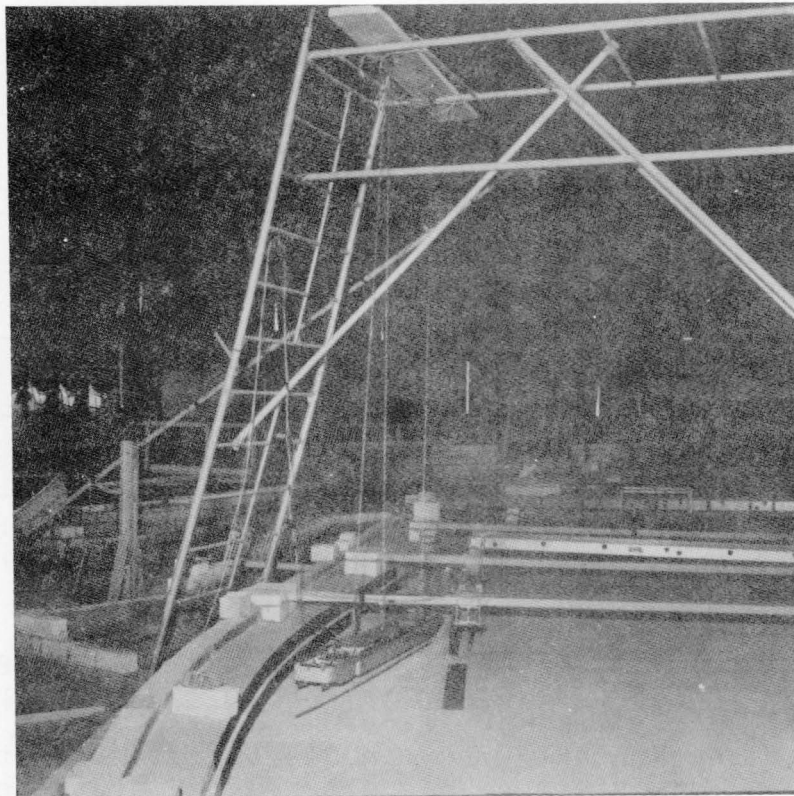


Bild 11 Pendelnd aufgehängter Schiffskörper für die Bestimmung der Charakteristik des Meßsystems (Pendellänge $l = 3,20$ m, $m = 19,3$ kg)

Anmerkung 3: Für die Versuche ist ein Leichter $76,5$ m x $11,4$ m x $2,50$ m mit einem Schubboot 19 m x $10,55$ m x $1,7$ m (Abmessungen Großausführung) im Modellmaßstab $1:50$ verkleinert eingesetzt worden. Die Masse des Modellschubverbandes betrug $m = 19,3$ kg, was in der Großausführung einem Verdrängungsvolumen von 2410 m³ gleichkommt. (Völligkeitsgrad $0,96$).

Durch verschiedene Pendelbewegungen wurden die Stoßgeschwindigkeiten und Stoßwinkel variiert.

Die Stoßgeschwindigkeit der Schiffsmasse wurde aus der Elongation berechnet.

Anmerkung 4: War der Körper am Anfang des Vorgangs in Ruhe, so gilt $\frac{1}{2} m \cdot v_s^2 = G \cdot h$; $m = G/g$; $v_s = \sqrt{2gh}$.

Die Gleichung gilt hier annähernd genau, da ja keine merkbare Reibung entsteht.

Durch die Eichung des Meßsystems waren folgende Zusammenhänge zu klären:

- a) Die Abhängigkeit herauszustellen, die zwischen den stoßvorgangsbeschreibenden Größen $F(t) = f[a(t)]$ besteht und diese möglichst in einer Beziehung darzustellen.
- b) Die Bandbreite zu ermitteln, innerhalb der die zueinander gehörenden Meßwerte $a(t)$ und $F(t)$ streuend liegen, welche unter exakt gleichbleibenden Ausgangsbedingungen, d.h. konstanten Stoßgeschwindigkeiten v_s und Stoßwinkel α aufgezeichnet wurden.
- c) Eine Bezugsebene zu erstellen, die es ermöglicht, den Einfluß des umgebenden Wassers auf den Stoßvorgang darzustellen.

Die Bilder 12 und 13 beinhalten die Größen $F(t)$ und $a(t)$, die mit der in Bild 3 dargestellten Anordnung der Kraft- und Beschleunigungsaufnehmer während der ausgeführten Stoßvorgänge erfaßt wurden. Die erfaßten Meßwerte wurden entsprechend Abschnitt 3 und Bild 4 in die tangentiale und normale Wirkungsrichtung transformiert. Für eine vergleichende Übersicht sind auf den Bildern 12 und 13 auch die Meßwerte eingetragen, die unter den Bedingungen der wasserumgebenen Schiffsmasse aufgenommen wurden (vollausgefüllte Signatur).

Die aus den Bildern 12 und 13 erkennbaren Erscheinungen können wie folgt formuliert werden:

1. Die auf das Bauwerk wirkende gemittelte maximale Stoßkraft ist von der negativen Beschleunigung annähernd linear abhängig.
2. Unter gleichbleibenden Randbedingungen und gleichgroßen negativen Beschleunigungen können die auf das Bauwerk wirkenden Maximalkräfte unterschiedliche Werte erreichen und von den unter Punkt 1 genannten Mittelwerten stark abweichen.

3. Die beim Schiffsstoß auf das Bauwerk übertragene Kraft ist also eine Zufallsgröße, die innerhalb bestimmter Grenzen variiert (hierzu siehe Abschnitt 4.3).
4. Bei unveränderten Ausgangsbedingungen werden also stark abweichende Größen erzeugt. Ein ganz bestimmter Wert kann in der betrachteten Bewegungsrichtung daher nur in Form einer Wahrscheinlichkeitsaussage angegeben werden.

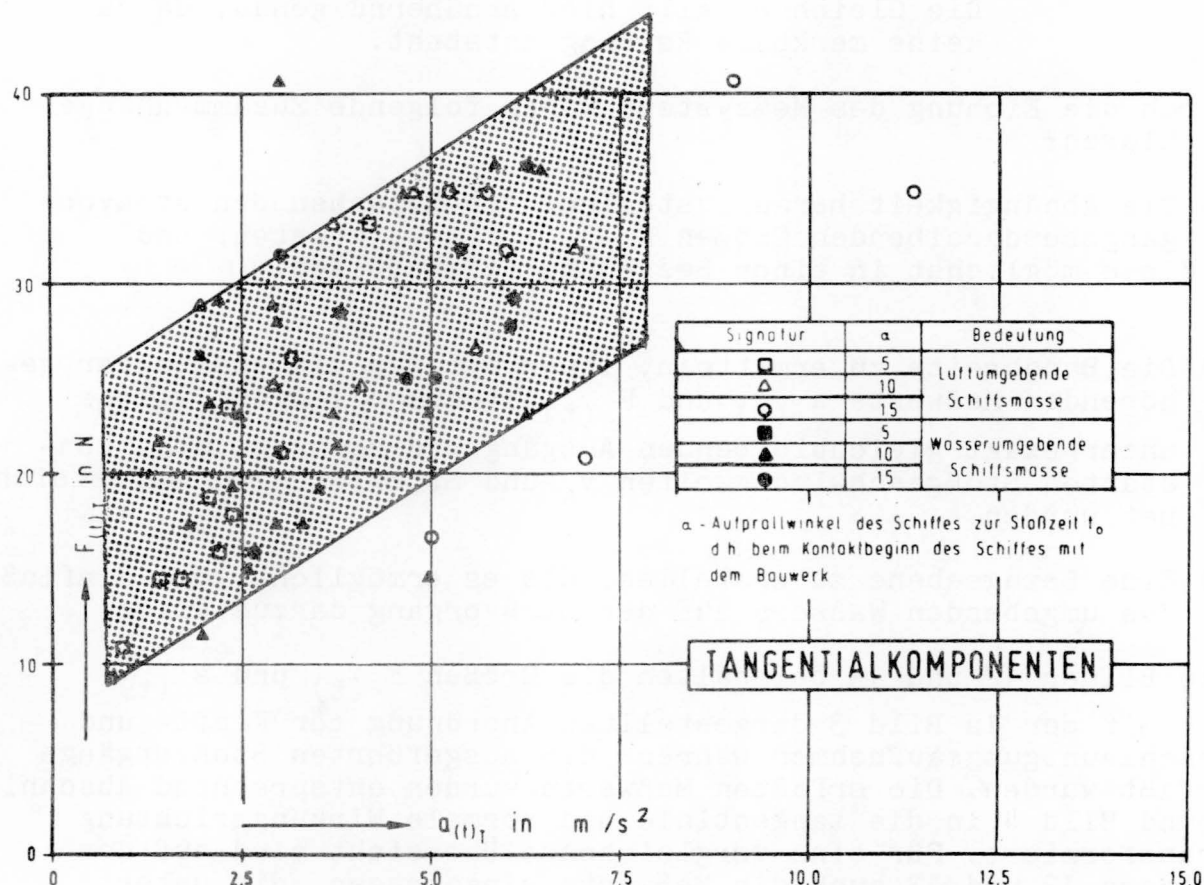


Bild 12 An den Biegestäben gemessener Kraftanteil $F(t)_T$ in Abhängigkeit von der negativen Beschleunigung der stoßenden Schiffsmasse $a(t)_T$

Im weiteren wird daher der Schiffsstoß als ein stochastischer Vorgang betrachtet.

Durch das Studium des Schiffsstoßes im Modell kann lediglich Aufschluß über die Änderung der Stoßkraft infolge der das Schiff umgebenden Wassermasse gefunden werden. Bei dieser Art der Untersuchung kann nicht die maximale Kraftgröße, die

auf das Bauwerk wirkt, angegeben werden, sondern vielmehr wie diese maximale Kraft in Relation zu der steht, die bei luftumgebener Schiffsmasse hervorgerufen wird.

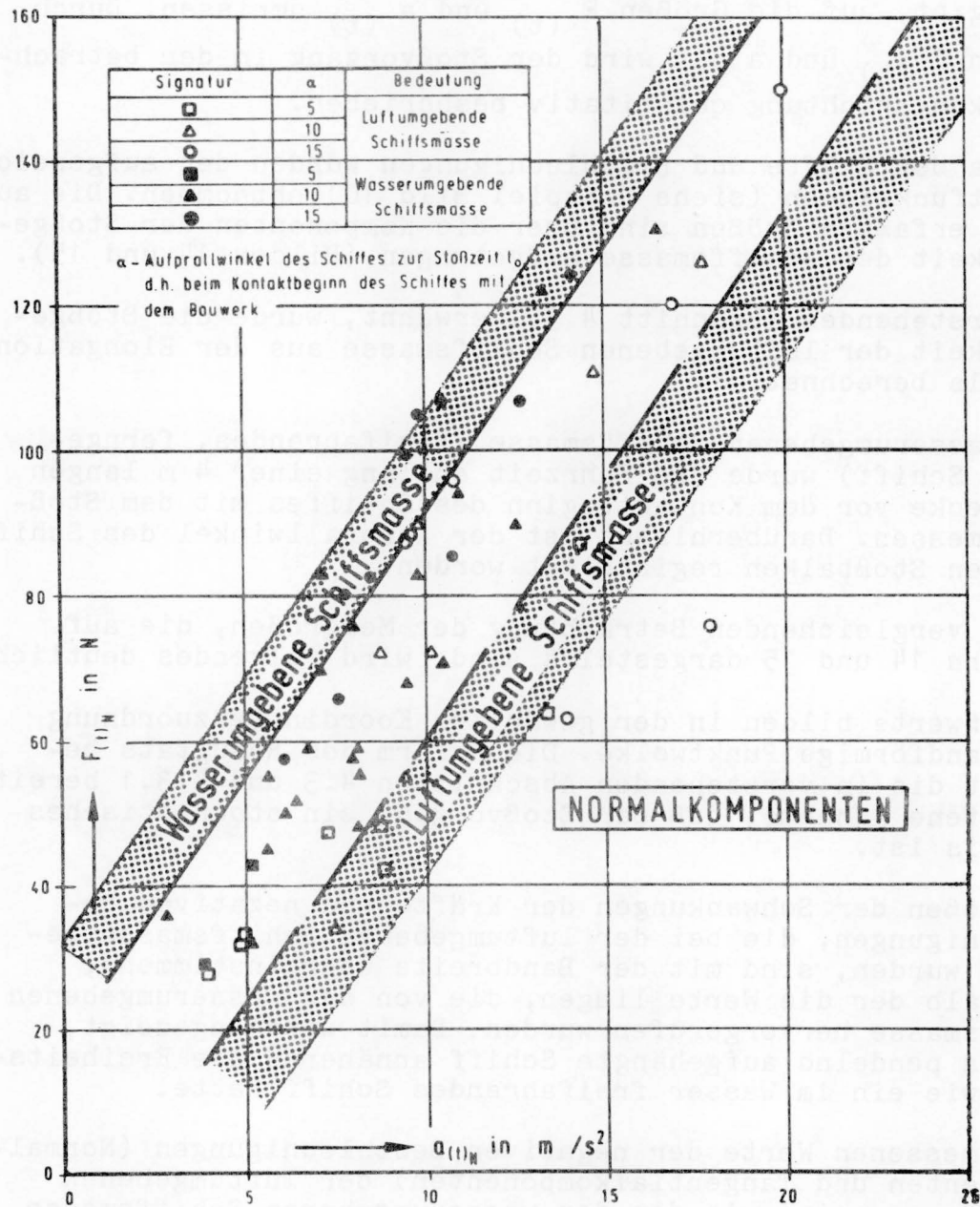


Bild 13 An den Biegestäben gemessener Kraftanteil $F(t)_N$ in Abhängigkeit von der negativen Beschleunigung der stoßenden Schiffsmasse $a(t)_N$

In allen noch folgenden Darstellungen sind daher die mit der luftumgebenen Schiffsmasse erzeugten Größen vergleichshalber eingetragen. Dadurch werden die interessierenden Unterschiede sofort deutlich.

4.3.2 Maxima der Kräfte und Beschleunigungen in der betrachteten Bewegungsrichtung

In diesem Abschnitt wird der Einfluß der Stoßgeschwindigkeit der Schiffsmasse sowie die der Wassermasse, die den Schiffskörper umgibt, auf die Größen $F(t)$ und $a(t)$ umrissen. Durch die Größen $F(t)$ und $a(t)$ wird der Stoßvorgang in der betrachteten Wirkungsrichtung quantitativ beschrieben.

Die Maxima der Kräfte und Beschleunigungen wurden den aufgezeichneten Zeitfunktionen (siehe Beispiel Bild 10) entnommen. Die auf diese Art erfaßten Größen sind über die Komponenten der Stoßgeschwindigkeit der Schiffsmasse aufgetragen (Bilder 14 und 15).

Wie im vorstehenden Abschnitt 4.3.1 erwähnt, wurde die Stoßgeschwindigkeit der luftumgebenen Schiffsmasse aus der Elongation des Pendels berechnet.

Bei der wasserumgebenen Schiffsmasse (freifahrendes, ferngesteuertes Schiff) wurde die Fahrzeit entlang einer 4 m langen Modellstrecke vor dem Kontaktbeginn des Schiffes mit dem Stoßbalken gemessen. Darüberhinaus ist der Aufprallwinkel des Schiffes auf den Stoßbalken registriert worden.

Bei einer vergleichenden Betrachtung der Meßgrößen, die auf den Bildern 14 und 15 dargestellt sind, wird folgendes deutlich:

1. Die Meßwerte bilden in der gewählten Koordinatenzuordnung eine bandförmige Punktwolke. Diese Form des Resultats bestätigt die in vorstehenden Abschnitten 4.3 und 4.3.1 bereits getroffene Annahme, daß der Stoßvorgang ein stochastisches Ereignis ist.
2. Die Größen der Schwankungen der Kräfte und negativen Beschleunigungen, die bei der luftumgebenen Schiffsmasse gemessen wurden, sind mit der Bandbreite übereinstimmend, innerhalb der die Werte liegen, die von der wasserumgebenen Schiffsmasse hervorgerufen wurden. Damit wird angezeigt, daß das pendelnd aufgehängte Schiff annähernd die Freiheitsgrade wie ein im Wasser freifahrendes Schiff hatte.
3. Die gemessenen Werte der negativen Beschleunigungen (Normalkomponenten und Tangentialkomponenten) der luftumgebenen Schiffsmasse sind mit den der wasserumgebenen Schiffsmasse übereinstimmend. Diese Aussage ist auch für die Tangentialkomponenten der am Bauwerk gemessenen Kraftanteile $\max F(t)$ zutreffend.
4. Die Normalkomponenten der am Bauwerk gemessenen Kraftanteile $\max F(t)$, welche mit der wasserumgebenen Schiffsmasse erzeugt wurden, sind im Vergleich zu den Komponenten der luftumgebenen Schiffsmasse in einem etwas höheren Wertebereich angesiedelt (Bild 14).

Aus den bisher besprochenen Zusammenhängen kann man erkennen, daß bei gleicher Geschwindigkeit der stoßenden Masse, die auf das Bauwerk wirkende Normalkomponente der Kraft bei der wasserumgebenen Schiffsmasse im Mittel größere Werte als bei der luftumgebenen Schiffsmasse annehmen wird.

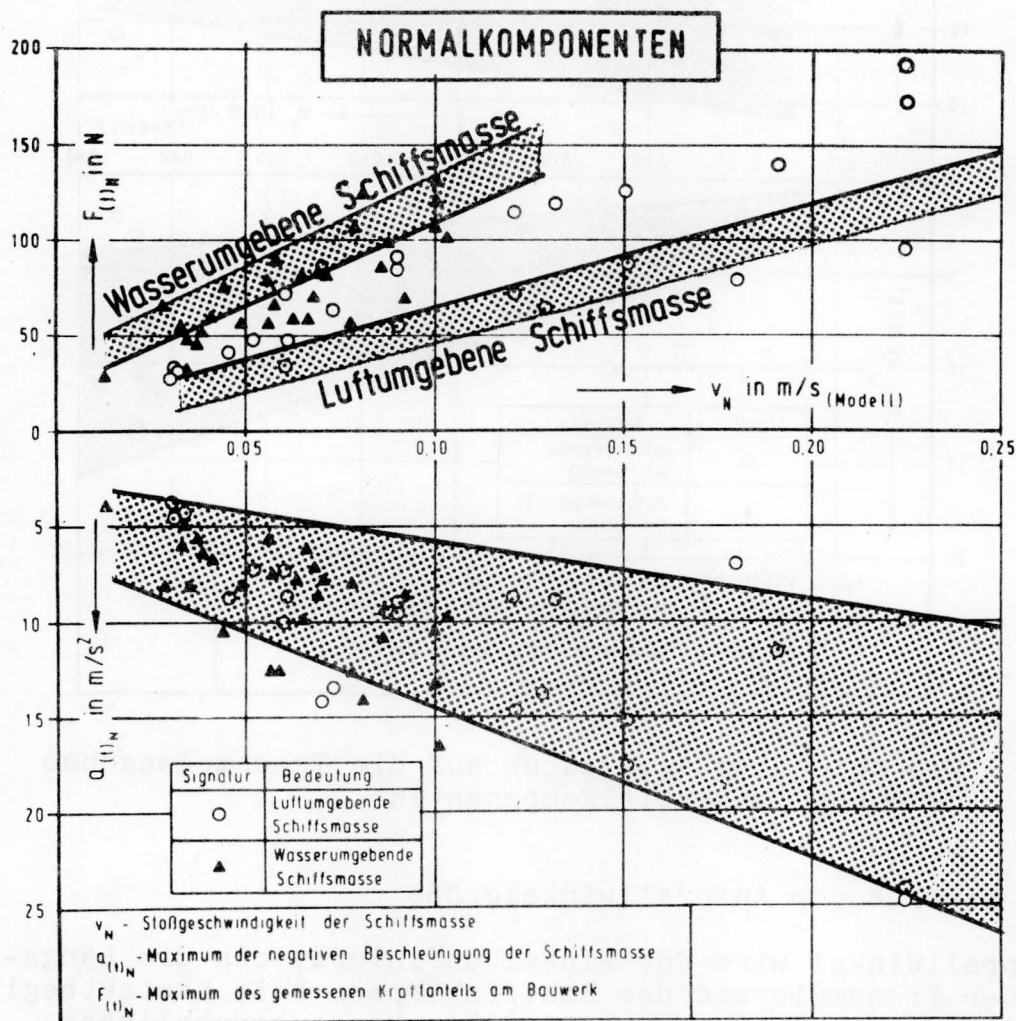


Bild 14 Auf die Trennmolenachse bezogene Normalkomponenten der Stoßkraft, die über DMS-Aufnehmer gemessen wurden, in Zuordnung zu den Geschwindigkeitskomponenten der Stoßmasse (oberer Diagrammteil). Normalkomponenten der negativen Beschleunigung der Stoßmasse (unterer Diagrammteil)

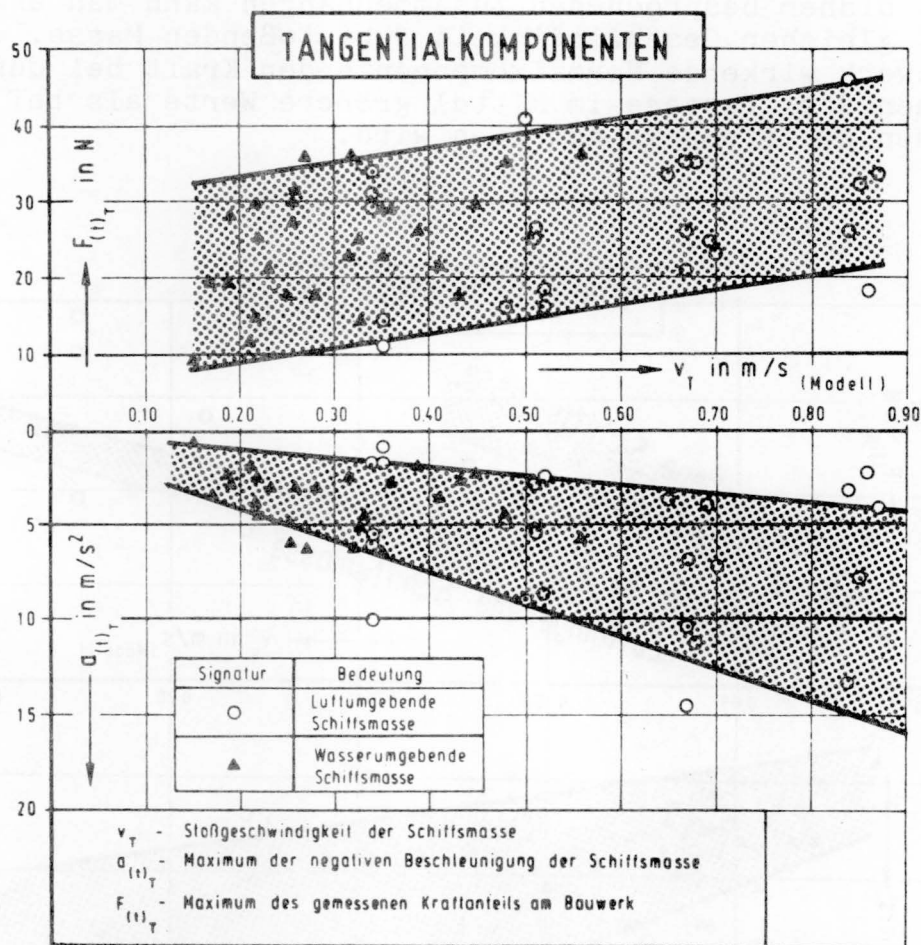


Bild 15 Wie Abbildung 14, jedoch auf die Trennmolenachse bezogene Tangentialkomponenten

4.3.3 Einfluß der Aufprallwinkelgröße

Als Aufprallwinkel wird der Winkel definiert, den die Längsachsen der Trennmole und des Schiffskörpers beim Kontaktbeginn der stoßenden Masse mit der gestoßenen Masse einschließen. In den hier erläuterten Versuchen wurde der Aufprallwinkel zwischen 5° bis 15° variiert.

Dadurch sollte geprüft werden, ob die aktiven Kräfte durch die Stellung des Schiffskörpers zum Bauwerk beeinflußt werden. Für eine schnelle Erfassung der Vorgänge wurde aus den Meßgrößen jedes ausgeführten Versuches der Stoßfaktor entsprechend der vorstehenden Gl. (15) berechnet. Somit bedeuten

$$\xi_N = \frac{m \cdot a(t)_N}{F(t)_N} = \left[1 + \frac{F(s) + F(R)}{F(t)} \right]_N \quad (20)$$

und

$$\xi_T = \frac{m \cdot a(t)_T}{F(t)_T} = \left[1 + \frac{F(s) + F(R)}{F(t)} \right]_T \quad (21)$$

In den vorstehenden Gleichungen (20) und 21) sind der Index "N" als Bezeichnung der Normalrichtung und der Index "T" als Bezeichnung der Tangentialrichtung anzusehen.

Die berechneten ξ -Werte sind den jeweils zutreffenden Komponenten der Stoßgeschwindigkeit zugeordnet worden (Bild 16). Der jeweils geltende Aufprallwinkel ist durch Signatur erkennbar.

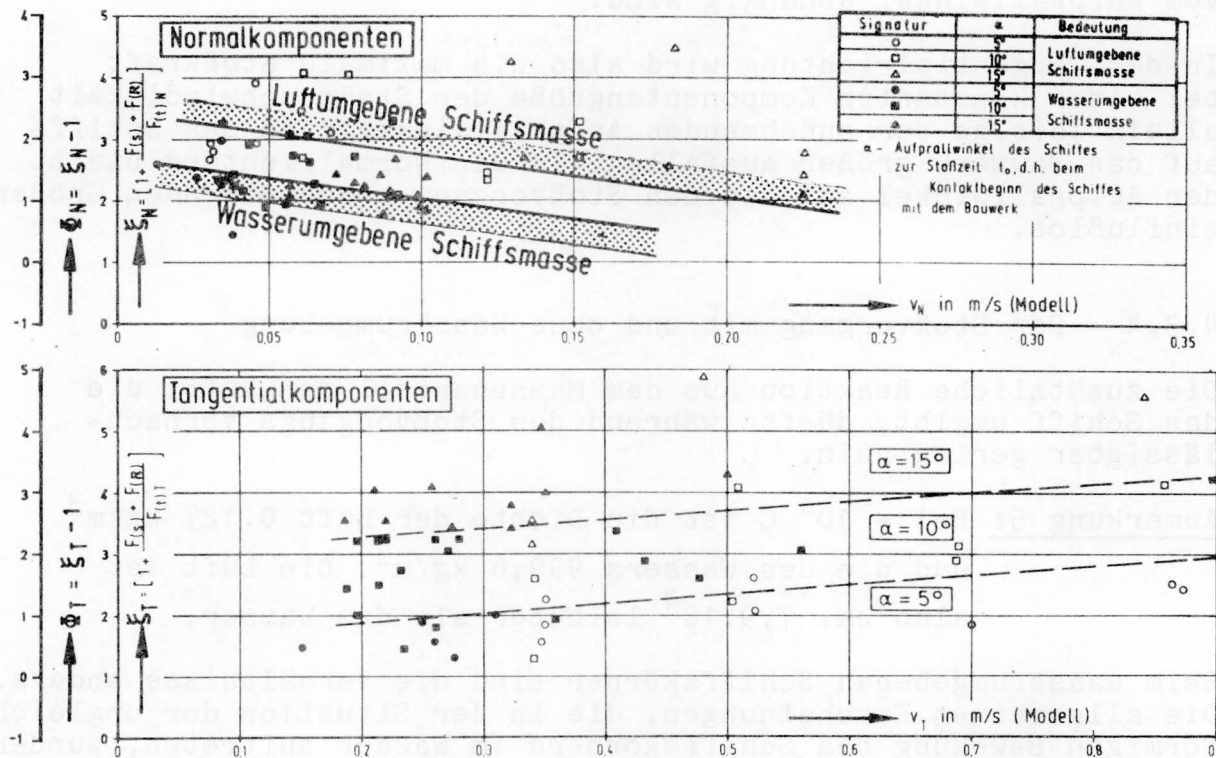


Bild 16 Stoßfaktor $\xi = m \cdot a(t) / F(t)$ in Zuordnung zu den Komponenten der Stoßgeschwindigkeit V_N und V_T

Diese Darstellung erscheint insofern sinnvoll, als sie in der hier gewählten Aufbereitungsart alle gemessenen Größen erfaßt und einen schnellen Überblick der Zusammenhänge gibt. Man sieht (Bild 16), daß die berechneten ξ -Werte aus den unter Abschnitt 4.3 genannten Gründen sowohl bei der luftumgebenen als auch bei der wasserumgebenen Schiffsmasse stark streuen.

Unabhängig von den evidenten Wertdifferenzen erhält man jedoch ein Bild, dem folgendes zu entnehmen ist (Bild 16):

- Der Aufprallwinkel hat im Bereich der untersuchten Winkelgrößen auf die Normalkomponenten der maximalen Stoßkräfte keinen erkennbaren Einfluß.

- b) Bei den Tangentialkomponenten ist offensichtlich, daß der Stoßfaktor mit zunehmendem Aufprallwinkel größere Werte annimmt. Unter Berücksichtigung der Gleichung (21) wird sofort deutlich, daß somit auch die aktiven Kräfte in dieser Wirkungsrichtung vom Aufprallwinkel abhängig sein müssen.

Als Fazit vorstehender Ausführungen ergibt sich also, daß die wirksamen Stoßkräfte in der Tangentialrichtung nicht nur von der Größe der Komponente der Stoßgeschwindigkeit sondern auch vom Aufprallwinkel abhängig sind.

In der Tangentialrichtung wird also die maximale Stoßkraft bei einer konstanten Komponentengröße der Stoßgeschwindigkeit allein infolge der zunehmenden Aufprallwinkelgröße des Schiffs auf das Bauwerk größer ausfallen. In der Normalrichtung bleibt der Aufprallwinkel auf die den Stoßvorgang beschreibenden Größen einflußlos.

4.3.4 Der Stoßvorgang mit und ohne Wasserumgebung

Die zusätzliche Reaktion aus dem Massenanteil der Luft, die das Schiff umgibt, dürfte während des Stoßvorgangs vernachlässigbar gering sein.

Anmerkung 5: Bei $+ 10^{\circ} \text{ C}$ ist die Dichte der Luft $0,127 \text{ kg/m}^3$ und die des Wassers $999,6 \text{ kg/m}^3$. Die Luft ist also ca. $7,9 \cdot 10^4$ leichter als das Wasser.

Beim wasserumgebenen Schiffskörper sind die Verhältnisse anders. Die allgemeinen Erscheinungen, die in der Situation der ungleichförmigen Bewegung des Schiffskörpers im Wasser auftreten, wurden bereits im vorstehenden Abschnitt 3 behandelt. Bei der plötzlichen Änderung der Geschwindigkeit müssen auf das Schiff negative Druckkräfte wirken, die infolge zeitlich wechselnder Verteilung der Geschwindigkeitsfelder ($\frac{\rho}{2} u^2$) und der negativen Beschleunigung (hierzu siehe auch Bild 5) erzeugt werden. Darüberhinaus muß noch berücksichtigt werden, daß die Wasseroberfläche um den Schiffskörper während des Stoßvorganges nicht mehr horizontal und eben ist, sondern in einer von der Form des eingetauchten Körpers und der Linienführung der Fahrwasserbegrenzung abhängigen Weise verformt wird.

Durch die folgende Gleichung (22) läßt sich der Einfluß des Mediums, das den Schiffskörper umgibt, erfassen:

$$m \cdot a(t) + F_{WB} + F_{WU} = F(t) + F(s) + F(R) \quad (22)$$

Die Bedeutung aller Zeichen ist der Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen zu entnehmen.

Wenn man die in der Gleichung (15) festgelegte Definition berücksichtigt, so erhält man für den wasserumgebenen Schiffskörper die Gleichung (23):

$$\xi = 1 + \frac{F(R) + F(s) - F_{WB} - F_{WU}}{F(t)} = \frac{m \cdot a(t)}{F(t)} \quad (23)$$

Eine dimensionslose Stoßverlustzahl

$$\Phi = \frac{\text{Kraftverluste des Meßsystems}}{\text{gemessener Kraftanteil}} \quad (24)$$

ist für die weiteren Überlegungen zweckmäßig. Durch die Stoßverlustzahl Φ wird der Summenanteil aller systemabhängiger Verluste in der betrachteten Bewegungsrichtung erfaßt. Für die luftumgebene Schiffsmasse werden die Ausdrücke F_{WB} und F_{WU} praktisch Null sein. Die Stoßverlustzahl läßt sich mit der Gleichung (25) berechnen

$$\Phi_L = \frac{m \cdot a(t)_{\text{Luft}}}{F(t)_{\text{Luft}}} - 1 = \frac{F(R) + F(s)}{F(t)} = \xi_L - 1 \quad (25).$$

Beim wasserumgebenen Schiffskörper ergibt sich die Stoßverlustzahl Φ_W zu

$$\Phi_W = \frac{m \cdot a(t)_{\text{Wasser}}}{F(t)_{\text{Wasser}}} - 1 = \frac{F(R) + F(s)}{F(t)} - \frac{F_{WB} + F_{WU}}{F(t)} - 1 = \xi_W - 1 \quad (26a)$$

Die Stoßverlustzahlen, die der luft- bzw. wasserumgebenen Schiffsmasse zuzuordnen sind, müssen sich also um den Wertanteil $(F_{WB} + F_{WU})/F(t)$ unterscheiden

$$\Phi_W = \Phi_L - \frac{F_{WB} + F_{WU}}{F(t)_{\text{Wasser}}} \quad (26b)$$

Der Kraftanteil der Wasserreaktion $F_{WB} + F_{WU}$ ist von der Projektionsfläche des Schiffskörpers in der betrachteten Bewegungsrichtung abhängig.

Anmerkung 6: Die Projektionsfläche des Europaschiffes ist in der Querrichtung mindestens achtmal größer als in der Längsrichtung. Darüberhinaus ist beim streifenden Stoß in der Längsrichtung auch die negative Beschleunigung bedeutend kleiner als in der Querrichtung. Infolgedessen können zwischen der luft- und wasserumgebenen Schiffsmasse in der Längsrichtung (Tangentialrichtung) keine nennenswerten Unterschiede zum Vorschein kommen.

Geht man jetzt zu einer Betrachtung der Stoßverlustzahlen über (Bild 16), die den Stoßgeschwindigkeitskomponenten zugeordnet sind, so findet man die vorstehend beschriebenen Zusammenhänge durch die Meßergebnisse eindrucksvoll bestätigt.

In der betrachteten Normalrichtung liegen die Stoßverlustzahlen, die zur wasserumgebenen Schiffsmasse gehören, unter den Werten, die der luftumgebenen Schiffsmasse zuzuordnen sind. In der Normalrichtung werden also infolge der wasserumgebenen Schiffsmasse im Vergleich zur luftumgebenen Schiffsmasse bei kleineren Beschleunigungen $a(t)$ größere Kräfte $F(t)$ auf das Bauwerk

übertragen. In der Tangentialrichtung kann dagegen zwischen der luft- und wasserumgebenen Schiffsmasse kein Unterschied festgestellt werden (Bild 16).

4.3.5 Ersatzmasse (virtuelle Masse) für ein wasserumgebenes Schiff

In den Werten der eingeführten Stoßverlustzahlen Φ kommen die tatsächlich vorhandenen Unterschiede zwischen den Kräften zum Vorschein, die während des Schiffsstoßes im Fall einer luftumgebenen und wasserumgebenen Schiffsmasse wirksam sind.

Es waren daher Versuchsserien durchzuführen, die einen ausreichenden Stichprobenumfang haben und dadurch erlauben, zufällige Fehler, die bei der Versuchsdurchführung auftreten, weitgehend zu eliminieren. Die einzelne Stoßverlustzahl Φ ist als Zufallsstichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit anzusehen. Die Sicherheitswahrscheinlichkeit ist dabei durch statistische Auswertungsverfahren abzugrenzen. Wie bereits unter Abschnitt 4.3 erwähnt wird, hat das freifahrende Schiff sechs Freiheitsgrade. Jeder ausgeführte Schiffsstoß ist daher eine echte Zufallsstichprobe.

Es kann nur ein Erwartungswert mit einer dazugehörenden Wahrscheinlichkeit aus den realisierten Experimenten ermittelt werden. Die Werte der gemessenen Kräfte $F(t)$ und Beschleunigungen $a(t)$ der betrachteten Bewegungsrichtung sind ein Bestandteil einer Verteilerfunktion, die mit einer dazugehörenden Wahrscheinlichkeitsfunktion im Zusammenhang stehen. Aus dem Grunde wurden die einzelnen Stoßverlustzahlen Φ der Versuchsreihe in Summenhäufigkeitskurven erfaßt (Bild 17).

Die Summenhäufigkeitskurven gestatten die Abschätzung, welcher Prozentsatz einer Verlustgröße kleiner als Φ_* ist. Diese Kurven lassen sich auch leicht vergleichen, wenn man sie in ein Koordinatennetz einzeichnet (Bild 17). Den so aufgetragenen Summenhäufigkeitskurven können nun die jedem einzelnen Häufigkeitsprozentsatz zugehörigen Werte der stoßbedingten Verluste für die wasserumgebene und luftumgebene Schiffsmasse entnommen und in Relation gesetzt werden (Bild 18).

Auf Bild 18 sind die Verhältniszahlen $\lambda = \Phi_L / \Phi_W$ über der prozentualen Summenhäufigkeit dargestellt. Wenn man eine Ersatzmasse für die praktische Handhabung ermitteln will, die alle Einflüsse des umgebenden Wassers auf den Stoßvorgang berücksichtigt, so müssen nachstehende physikalische Zuordnungsvorschriften in die Überlegungen einbezogen werden.

Ein streifender Stoß kann als Übertragung von Beschleunigungsarbeit definiert werden. Die Beschleunigungsarbeit ist das Produkt aus der Beschleunigungskraft $F = m \cdot a$ und einer Beschleunigungsstrecke $f = a/2 \cdot t^2$. Die kinetische Energie der stoßenden Schiffsmasse kann dem Produkt $F \cdot f$ gleichgesetzt werden.

(27)

$$F \cdot f = \frac{m_W \cdot m \cdot v_s^2}{2} = F \cdot \frac{a}{2} \cdot t^2$$

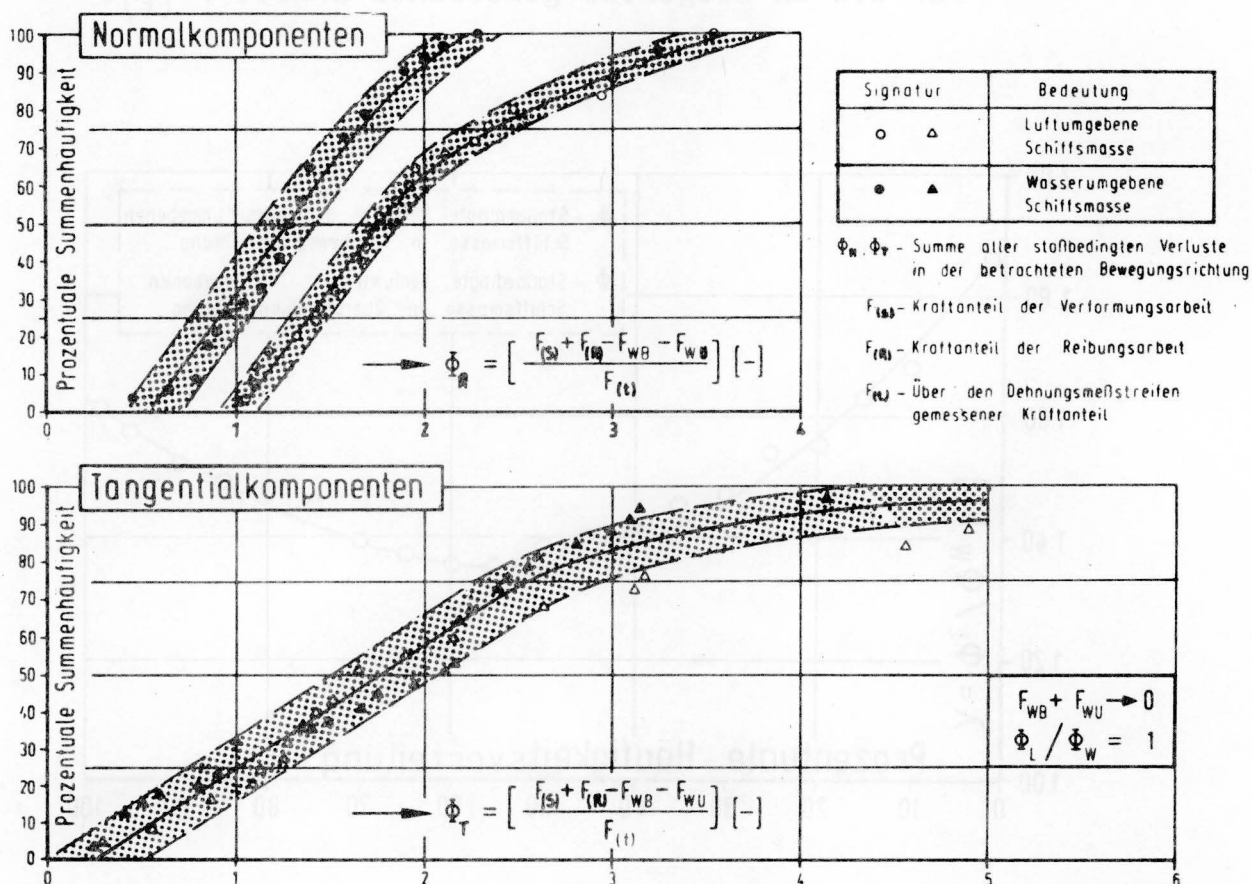


Bild 17 Die Summenhäufigkeitskurven der Stoßverlustzahlen aus dem Gesamtumfang der Versuchsreihen aufgestellt

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (20), (25) und (26) kann für die Beschleunigungskraft folgender Ansatz gemacht werden:

a) Luftumgebene Schiffsmasse

$$F_1 = m \cdot a(t)_L = F(t)_L \cdot [1 + \Phi_L] = m \cdot a_L \cdot [1 + \Phi_L] \quad (28)$$

b) Wasserumgebene Schiffsmasse

$$F_2 = m \cdot a(t) + F_{WB} + F_{WU} = F(t)_W \cdot [1 + \Phi_W] = m \cdot a_W \cdot [1 + \Phi_W] \quad (29)$$

Hierin

a_L und a_W - Äquivalentgrößen der negativen Beschleunigung für die am Biegestab gemessenen Kräfte $F(t)$.

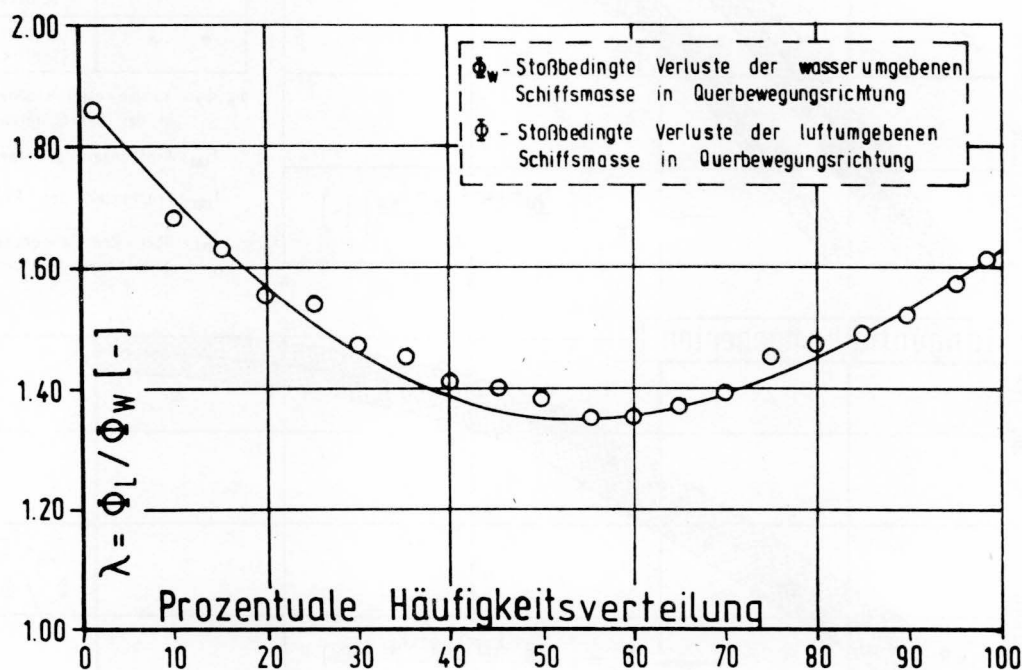


Bild 18 Verhältniszahlen $\lambda = \Phi_L / \Phi_W$ in Zuordnung zu der prozentualen Häufigkeit der Einzelversuche im betrachteten Realisierungsumfang

Unter der Annahme $a_W/a_L = m_W$ und unter Beachtung $\lambda = \Phi_L / \Phi_W$ ergibt sich F_2 zu

$$F_2 = m_W \cdot m \cdot a_L \cdot [1 + \Phi_L / \lambda] \quad (30)$$

Die Ersatzmasse $m_N = m \cdot m_w$ soll quasi von dem Kraftanteil der Wasserreaktion beschleunigt gelten. Die tatsächlich vorhandenen Unterschiede zwischen den Stoßkräften der luft- und wasserumgebenen Schiffsmasse kann man aus den Ergebnissen der Versuchsreihen unter der Voraussetzung

$$F_1 = F_2$$

bestimmen.

Die Gleichungen (28) und (30) gehen dann in den Ausdruck (31) über

$$m \cdot a_L \cdot \left[1 + \Phi_L \right] = m_w \cdot m \cdot a_L \cdot \left[1 + \frac{\Phi_L}{\lambda} \right] \quad (31)$$

Daraus ergibt sich die Vergrößerungsfunktion der ungleichförmigen Bewegung m_w zu

$$m_w = \frac{\lambda \cdot [1 + \Phi_L]}{\lambda + \Phi_L} \quad (32)$$

Aus den aufbereiteten Versuchsergebnissen (Bilder 17 und 18) sind die Zahlenwerte m_w mit der vorstehenden Gleichung (32) berechnet und auf Bild 19 dargestellt worden.

Bild 19 zeigt, daß der m_w -Faktor keine konstante Größe darstellt, was auf den stochastischen Charakter der Stoßereignisse zurückzuführen ist (siehe auch vorstehender Abschnitt 4.3). Die Lage des durchschnittlichen Wertes der Meßreihe und die Schwankung der Einzelwerte um den Mittelwert kann durch den Mittelwert m_w und die Standardabweichung angegeben werden. Durch die begrenzte Versuchszahl hat man zu berücksichtigen, daß der hier berechnete Mittelwert mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit zum Mittelwert der Grundgesamtheit (aller möglichen Realisierungen) behaftet ist.

$$\bar{m}_w - \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} < m_w < \bar{m}_w + \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (33)$$

Aus diesem Grunde muß hier der Begriff der Vertrauenswahrscheinlichkeit erwähnt werden. Die gewählte Vertrauenswahrscheinlichkeit besagt nämlich, daß die berechneten Werte in etwa p % der Fälle den Parameter überdecken und ihn nur in $100-p$ % der Fälle nicht erfassen.

Der Mittelwert der Grundgesamtheit m_w ist unbekannt. Dadurch bedingt sind aus den ausgeführten Versuchen zwei Werte m_{links} und m_{rechts} zu berechnen, die mit einer bestimmten, nicht zu kleinen Wahrscheinlichkeit die unbekannte Größe m_w irgendwo zwischen sich einschließen.

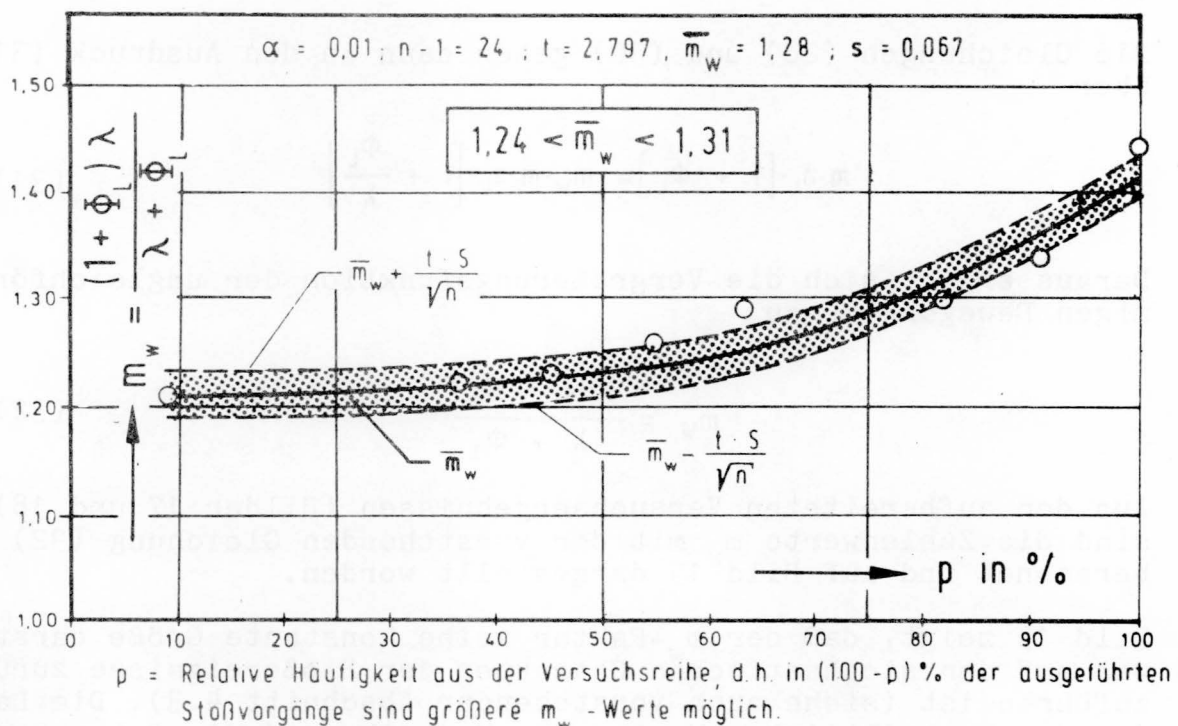


Bild 19 Vergrößerungsfunktion m_w für die Bestimmung der Ersatzmasse $m_N = m_w \cdot m$ eines wasserumgebenen Schiffskörpers in der Querrichtung

Die gesuchte Größe liegt dann mit der statistischen Sicherheit S zwischen den Vertrauensgrenzen

$$m_w \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (34)$$

Die Bedeutung der verwendeten Symbole ist der Zusammenstellung der Bezeichnungen zu entnehmen.

Unter den Randbedingungen des Vorhafens, die in den Vorbemerkungen charakterisiert sind, kann für die in der Untersuchung eingesetzte Schiffsform ein mittlerer m_w -Faktor von rd. 1,3 angenommen werden. In rd. 80 % der realisierten Stoßereignisse wurde die genannte Größe unterschritten und in 20 % überschritten.

Die auf die Trennmole senkrecht wirkende Stoßkraft ergibt sich aus der Gleichung (27) zu

$$\frac{\min [m_W = f(p)] m \cdot v_N^2}{2f} < F_N < \frac{\max [m_W = f(p)] m \cdot v_N^2}{2f} \quad (35).$$

4.3.6 Ersatzmassenmoment 2. Grades für das wasserumgebene Schiff

Das freifahrende Schiff wird durch den Streifstoß nach dem Kontaktbeginn der Massen zur Drehbewegung gezwungen. Um den Bewegungsablauf des Schiffes zu beschreiben, ist es erforderlich, den Einfluß der Wasserreaktion auf das Massendrehmoment des Schiffes zu kennen. Für die Bestimmung eines solchen Ersatzmassenmomentes θ_M zweiten Grades wurden an der Stoßstelle und in der Drehachse des Modellschiffes Beschleunigungsaufnehmer angeordnet (siehe Skizze in Bild 20).

Für die luftumgebene Schiffsmasse sind bei der gewählten Meßanordnung nachstehende Beziehungen gültig:

$$\theta \cdot \dot{\varphi} = F(t) \cdot s_x \quad (36)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{a(t)_{y2} - a(t)_{y1}}{s_x} \quad (37)$$

$$\theta = \frac{F(t)_{\text{Luft}} \cdot s_x^2}{[a(t)_{y2} - a(t)_{y1}]_{\text{Luft}}} \quad (38).$$

Aus der Kraft $F(t)$ sowie den negativen Beschleunigungen $a(t)_{y2}$ und $a(t)_{y1}$, die beim Streifstoß des pendelnd aufgehängten, luftumgebenen Schiffskörpers aufgezeichnet wurden, kann man mit der Gleichung (38) die Massenmomente 2. Grades berechnen.

Bei der wasserumgebenen Schiffsmasse wird die Drehbewegung des Schiffes infolge der Wasserreaktion (hierzu siehe Abschnitt 5.3.4, Gl. (22)) verändert. Hierfür kann also folgende Beziehung gelten:

$$x \cdot [F_{WB} + F_{WU}] + \theta \cdot \dot{\varphi} = F(t) \cdot s_x \quad (39)$$

wobei

- x - Hebelarm, der den Abstand zwischen der Hochachse der Drehung (Schiffsmitte) und dem Angriffspunkt der Resultierenden aus den Kräften F_{WB} und F_{WU} angibt.

Durch die Substitution von $x \cdot (F_{WB} + F_{WU})$ durch

$$x \cdot [F_{WB} + F_{WU}] = [\theta_W - 1] \cdot \theta \cdot \dot{\varphi} \quad (40)$$

ergibt sich die Gleichung (39) zu

$$\theta_W \cdot \theta \cdot \dot{\varphi} = \theta_M \cdot \dot{\varphi} = F(t) \cdot s_x = \dot{\varphi} (\theta + \theta') \quad (41).$$

Hierin stellt θ_W eine Vergrößerungsfunktion des Massenmomentes 2. Grades dar, die den Einfluß der Wasserreaktion auf die Drehbewegung des Schiffes erfaßt.

①②- Beschleunigungsaufnehmer

$F(t)$ - über den DMS-Aufnehmer gemessener Kraftanteil

$a(t)$ - negative Beschleunigung in der betrachteten Bewegungsrichtung

$\dot{\varphi}$ - Winkelbeschleunigung

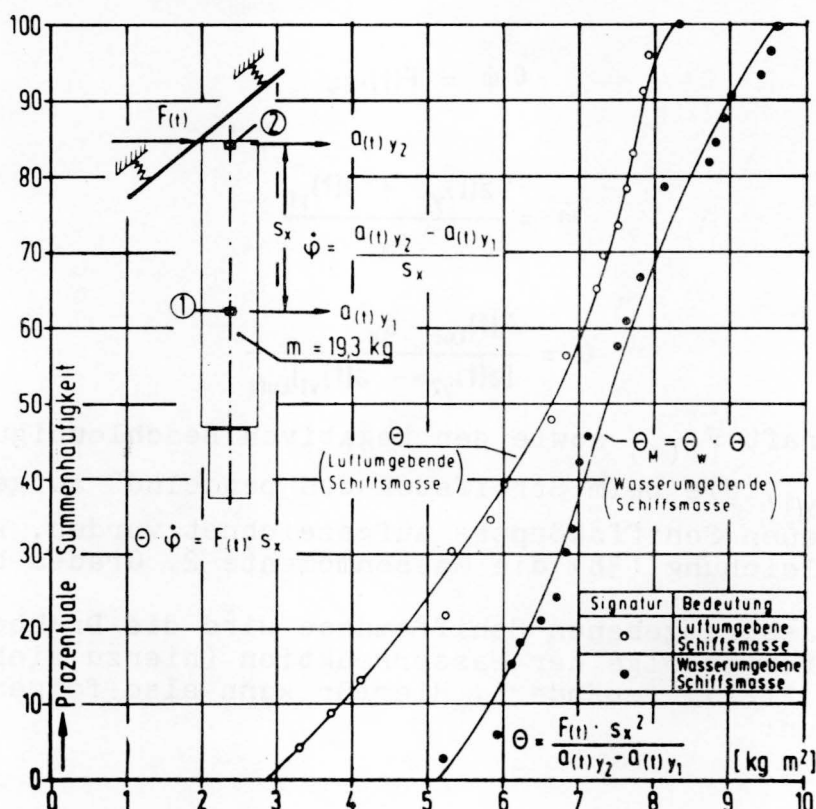


Bild 20 Summenhäufigkeitskurven der Massenmomente 2. Grades, für die luft- und wasserumgebene Schiffsmasse aus dem Gesamtumfang der Versuchsreihen aufgestellt

Daraus ergibt sich

$$\theta' + \theta = \theta_W \theta = \theta_M = \frac{F(t)_{\text{Wasser}} s_x^2}{[a(t)_{y2} - a(t)_{y1}]_{\text{Wasser}}} \quad (42)$$

$$\theta' = \theta \cdot (\theta_W - 1) \quad (43)$$

θ' - hydrodynamisches Massenmoment 2. Grades

wobei θ_M ein Ersatzmassenmoment 2. Grades für ein wasserumgebenes Schiff darstellt.

Auf Bild 20 sind in Form von Summenhäufigkeitskurven die berechneten θ - und θ_M -Werte aufgetragen.

Analog zu der Beschreibung des vorstehenden Abschnitts 4.3.5 konnte im Endergebnis aus den Größen von Bild 20 eine Vergrößerungsfunktion $\theta_W = \theta_M / \theta$ berechnet und dem Häufigkeitsprozentsatz zugeordnet werden (Bild 21).

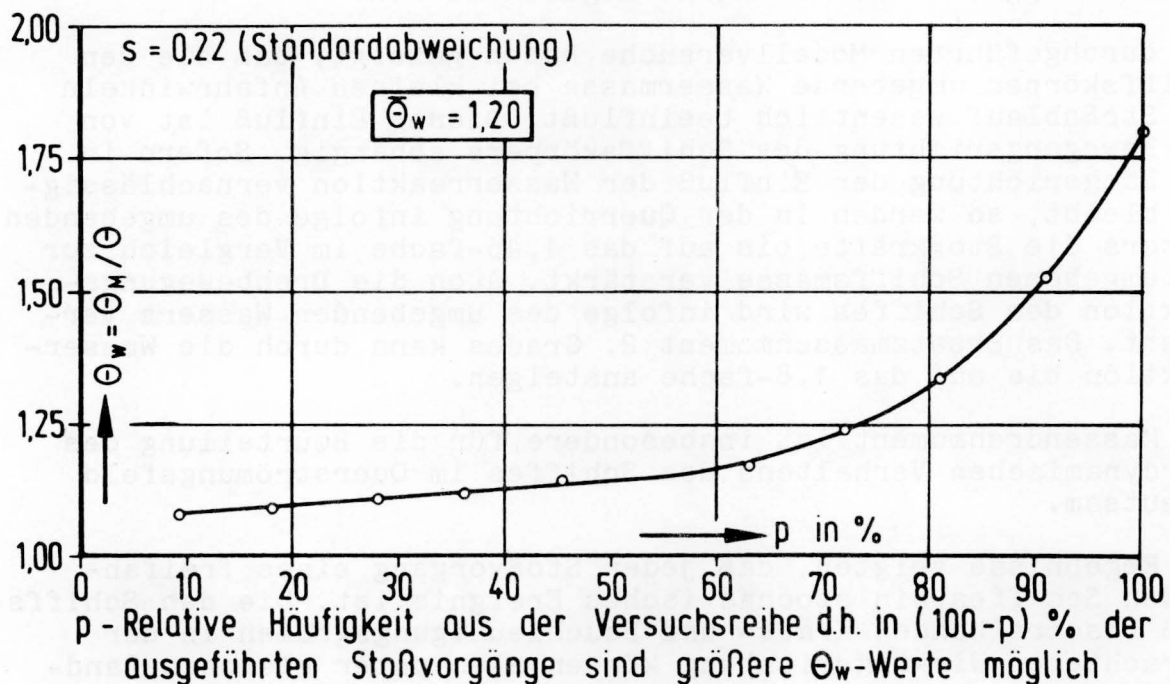


Bild 21 Vergrößerungsfunktion θ_W für die Bestimmung des Ersatzmassenmomentes 2. Grades eines wasserumgebenen Schiffs $\theta_M = \theta_W \cdot \theta$ bei der Drehung um die Hochachse

Der stochastische Charakter der Stoßereignisse kommt bei der Drehbewegung noch deutlicher als bei der Querbewegung des Schiffes zum Vorschein. Für die in der Untersuchung eingesetzte Schiffsform wurde ein mittlerer θ_W -Faktor von 1,2 bestimmt.

In rd. 65 % der ausgeführten Streifstöße wird die genannte Größe unterschritten und in 35 % überschritten. Die maximale Winkelbeschleunigung des Schiffes kann sich im Verhältnis zur luftumgebenen Schiffsmasse infolge der Wasserreaktion um das 1,1 - 1,8-fache verringern. Das Massendrehmoment des Schiffes ist also im Wasser mit einem Faktor $1,1 < \theta_W < 1,8$ zu erhöhen. Dieses Ergebnis ist für die Beurteilung des fahrdynamischen Verhaltens des Schiffes im Querströmungsfeld bedeutsam.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Aufgabenstellung war die Gesamtlast, die auf die Trennmole wirkt, zu ermitteln. Das Versuchsprogramm wurde dabei so gewählt, daß alle relevanten Einflüsse erfaßt wurden (Bild 5). Durch die Verfahrensweise wurden Voraussetzungen erbracht, die auch gewisse Rückschlüsse auf ähnlich strukturierte langgestreckte Bauwerke möglich machen.

Die durchgeführten Modellversuche haben gezeigt, daß die den Schiffskörper umgebende Wassermasse bei kleinen Anfahrwinkeln den Stoßablauf wesentlich beeinflusst. Dieser Einfluß ist von der Bewegungsrichtung des Schiffskörpers abhängig. Sofern in der Längsrichtung der Einfluß der Wasserreaktion vernachlässigbar bleibt, so werden in der Querrichtung infolge des umgebenden Wassers die Stoßkräfte bis auf das 1,45-fache im Vergleich zur luftumgebenen Schiffsmasse verstärkt. Auch die Drehbewegungsreaktion des Schiffes wird infolge des umgebenden Wassers verändert. Das Ersatzmassenmoment 2. Grades kann durch die Wasserreaktion bis auf das 1,8-fache ansteigen.

Das Massendrehmoment ist insbesondere für die Beurteilung des fahrdynamischen Verhaltens des Schiffes im Querströmungsfeld bedeutsam.

Die Ergebnisse zeigten, daß jeder Stoßvorgang eines freifahrenden Schiffes ein stochastisches Ereignis ist. Die den Schiffsstoß beschreibenden Kraft- und Beschleunigungsgrößen in der betrachteten Wirkungsrichtung können also unter gleichen Randbedingungen unterschiedliche Werte annehmen. Bei einer ausreichend großen Wiederholungszahl wird sich jedoch eine bestimmte Stabilität der gemessenen Wertgrößen einstellen, die innerhalb festliegender Grenzzahlen liegen werden.

Die Versuche waren so angelegt, daß die nicht modellgerecht abbildbaren Parameter bei der Ermittlung der Ersatzmasse bzw. des Ersatzmassenmomentes einflußlos sind.

6 Zusammenstellung der verwendeten Bezeichnungen

Symbol	Dimension	Bedeutung
m	kg	Luftumgebene Schiffsmasse im Modell $m = 19,3 \text{ kg}$
$a_{N_i} a(t)$	m/s^2	Negative Schiffsbeschleunigung, die mittels Akzelerometern in der betrachteten Bewegungsrichtung erfaßt wurde
θ	kg m^2	Massenmoment 2. Grades (Massenträgheitsmoment) der luftumgebenen Schiffsmasse
F	kg m/s^2	Beschleunigungskraft
$\dot{\varphi}$	$1/\text{s}^2$	Winkelbeschleunigung (siehe Gleichung (3))
π	-	Formabhängige Beziehung
U	m/s	Relativgeschwindigkeit des Körpers gegen die im genügend großen Abstand sich unbeeinflusst befindende Flüssigkeit
a^2	m^2	Körperfläche
l	m	Körperlänge
d_u/d_t	m/s^2	Beschleunigung des Körpers
m'	kg	Hydrodynamische Masse der umgebenen Flüssigkeit $m' = m(m_w - 1)$
F_{WB}	kg/ms^2	Durch die ungleichförmige Bewegung des Schiffskörpers erzeugte Druckkraft des Wassers (siehe Abschnitt 3, Bild 5 und Gleichung (4))
F_{WU}	kg/ms^2	$f(\varphi/2 \cdot u^2)$ Kraftanteil aus der zeitlich veränderlichen Verteilung der Geschwindigkeitsfelder um den Schiffskörper
$F_{(t)}$	kg/ms^2	An den Biegestäben gemessener Kraftanteil
$F_{(s)}$	kg/ms^2	Kraftanteil der Verformungsarbeit (wegabhängiger Term)
$F_{(R)}$	kg/ms^2	Kraftanteil der Reibungsarbeit (Geschwindigkeitsabhängiger Term)

Symbol	Dimension	Bedeutung
v	m/s	Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitskomponenten v_x ; v_y ; v_z der Strömung
m_w	-	Vergrößerungsfunktion der ungleichförmigen Bewegung der Schiffsmasse im Wasser
θ'	kg m ²	hydrodynamisches Massenmoment 2. Grades $\theta' = \theta \cdot (\theta_w - 1)$
θ_w	-	Vergrößerungsfunktion für die Bestimmung des Ersatzmassenmomentes 2. Grades einer Wasserumgebenen Schiffsmasse
ρ	kg/m ³	Dichte
p	kg/ms ²	Überdruck
z	m	geodätische Höhe
h_v	m	Summe aller Verlusthöhen bis zur betrachteten Stelle s
$C(t)$	m	zeitabhängige Funktion
F_w	kg.m/s ²	Widerstandskraft der Rückströmung
A	m ²	Bezugsfläche
c_w	-	von der Körperform abhängige Widerstandsziffer
r	m	Krümmungsradius der Stromlinie
ξ	-	Stoßfaktor s. Gl. (15) Abschnitt 3
N	Index	Bezeichnung der Normalrichtung
T	Index	Bezeichnung der Tangentialrichtung
ϕ	-	Stoßverlustzahl des Meßsystems
f	m	Verformungsstich in der Normalrichtung und Kontaktlänge in der Tangentialrichtung s. Gl. (27)
$\frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}$	kg	Vertrauensgrenzen mit der statistischen Sicherheit S (Mutungsgrenzen)

Symbole	Dimension	Bedeutung
$t_n = f(\alpha, FG)$	-	Faktor der Student-Verteilung (siehe L. Sachs "Angewandte Statistik" 1978)
\bar{m}_w	kg	Arithmetisches Mittel der Versuchsreihe
n	-	Ausgeführte Versuchszahl in der Versuchsreihe
s	kg	Standardabweichung der ausgeführten Versuchsreihe
α	-	Irrtumswahrscheinlichkeit
FG	-	Zahl "frei" verfügbarer Beobachtungen

7 Literatur

- Wendel, K. : Hydrodynamische Massen und hydrodynamische Massenträgheitsmomente
Jahrbuch der Schiffsbau technischen Gesellschaft 44 Band/1950 S. 208 - 255
Springer-Verlag
- Dietz, J.W. : Strömungsabweiser und/oder durchbrochene Trennmole als Mittel zur Verminderung der Querströmungen in oberen Vorhafenzufahrten am Beispiel der neuen Mainstau-
stufe Krotzenburg
Mitt.-Bl.d.BAW (1978) Nr. 43, S. 1 - 41
- Vasco, Costa : The Berthing Ship. The effect of impact on the Design of Fenders and other structures (1964).
The Dock & Harbour Authority, London 1964 ,
Published by Foxlow
Publications Ltd. London 1964
- Sachs, L. : Angewandte Statistik
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York 1978

